

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI DOTTORATO IN
INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLE STRUTTURE
Coordinatore: Prof. Ing. Domenico Acierno

XXI° CICLO

GABRIELE CINIGLIO

TESI DI DOTTORATO

***METODI COMBINATI PER LA
VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A
COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO***

***TUTOR:
Ing. Andrea Prota***

Sommario

SOMMARIO	1
PREMESSA	1
INTRODUZIONE.....	1
ATTIVITÀ DI LABORATORIO.....	5
CAPITOLO 1. LINEE GUIDA E PRESCRIZIONI NORMATIVE.....	7
1.1 PREMESSA	7
1.2 LO SVILUPPO DELLA NORMATIVA E DELLA PRATICA PROGETTUALE	9
1.3 GLI STATI LIMITE	10
1.4 VALUTAZIONE DEGLI EDIFICI ESISTENTI	11
1.5 LIVELLI DI CONOSCENZA	12
1.6 GEOMETRIA DELL'EDIFICIO	15
1.7 DETTAGLI COSTRUTTIVI.....	16
1.8 PROPRIETÀ DEI MATERIALI	17
1.9 PIANO DELLE INDAGINI.....	19
1.10 GLI ELABORATI DI PROGETTO	21
1.11 CAMPAGNA DI RILIEVO	22
1.12 SAGGE E PROVE PER INDIVIDUARE LE CARATTERISTICHE DEI DETTAGLI COSTRUTTIVI	23
1.12.1 Individuazione delle armature e dei dettagli costruttivi	23
1.13 PROGETTO SIMULATO	24
CAPITOLO 2. PROVE NON DISTRUTTIVE PROPEDEUTICHE ALLA VALUTAZIONE DEGLI EDIFICI ESISTENTI.....	27
2.1 INDAGINE PACOMETRICA.....	27
2.2 INDAGINE SCLEROMETRICA	30
2.2.1 Generalità	30
2.2.2 Principio di funzionamento	32
2.3 APPARECCHIO AD ULTRASUONI PER IL CONGLOMERATO CEMENTIZIO	34
2.3.1 Principi sulla generazione e sulla ricezione degli ultrasuoni. Generazione degli impulsi. effetto piezoelettrico ed effetto elettrostrittivo	38
2.3.2 Funzionamento delle sonde	44

2.3.3 Influenza delle proprietà chimiche, fisiche e strutturali dei materiali, della forma e delle condizioni superficiali del componente sulla propagazione degli ultrasuoni.....	46
2.4 LA TERMOGRAFIA	49
2.4.1 Generalità.....	49
2.4.2 Il telerilevamento e la termografia	52
2.4.3 Caratteristiche principali delle apparecchiature termografiche.....	54
2.4.4 Interpretazione delle immagini.....	55
2.5 LA TECNICA RADIOGRAFICA	60
2.5.1 Principio di funzionamento del tubo a raggi X.....	63
2.5.3 Applicabilità.....	67
2.6 CARBONATAZIONE	70
2.6.1 Fattori ambientali.....	71
2.6.2 Attacchi chimici	71
2.6.3 Effetti termici.....	73
CAPITOLO 3. CAMPAGNA SPERIMENTALE	76
3.1 PROVE IN SITU	76
3.2 PROVE NON DISTRUTTIVE	76
3.2.1 Indagine Pacometrica.....	77
3.2.2 Indagine Sclerometria	78
3.2.3 Indagine Ultrasonica	80
3.2.4 Indagine Termografica	81
3.2.5 Misura della profondità di carbonatazione	82
3.3 PROVE DISTRUTTIVE: CAROTAGGI E MICROCAROTAGGI	84
3.4 RACCOLTA DATI	85
3.5 PROVE IN LABORATORIO	87
3.5.1 Le procedure.....	88
3.5.2 Misure ultrasonore	89
3.5.3 Prove meccaniche	90
3.5.4 Risultati.....	91
3.6 ANALISI RADIOGRAFICA SUI PILASTRI PRELEVATI DALL'EDIFICIO DI PUNTA PEROTTI	92
CAPITOLO 4. ELABORAZIONE DEI DATI DI PROVA.....	99
4.1 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE CON PROVE NON DISTRUTTIVE	99

Sommario

4.2 ANALISI DEI DATI	100
4.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA CON PROVE SCLEROMETRICHE	102
4.4 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA CON PROVE ULTRASONORE	102
4.5 PROVE COMBinate SCLEROMETRO-ULTRASUONI (METODO SONREB)	105
4.6 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA CARATTERISTICA DEL CALCESTRUZZO CON METODI COMBINATI (SONREB)	106
4.6.1 Formula di Correlazione RILEM NDT1	107
4.6.2 Formula di Correlazione (Di Leo, Pascale)	108
4.6.3 Formula di Correlazione (Y. Tanigawa- K. Baba – H. Mori)	111
4.7 DISTRIBUZIONE DELLE RESISTENZE FC DELLE CAROTE PRELEVATE	112
4.7.1 Modellazione delle incertezze sulla resistenza del materiale	112
4.7.2 Distribuzione f_c delle carote $\varnothing 100$ mm	115
4.7.3 Distribuzione f_c microcarote diametro 32 mm	117
4.8 CONFRONTO DEI VARI METODI UTILIZZATI TRA CAROTE E MICROCAROTE	118
CONCLUSIONI	126
CAROTE $\varnothing 100$ MM	130
MICROCAROTE $\varnothing 32$ MM	159
BIBLIOGRAFIA	193
INDICE DELLE TABELLE	195
INDICE DELLE FIGURE	196
RINGRAZIAMENTI	199

Premessa

La valutazione di resistenza degli edifici esistenti in calcestruzzo armato è diventato un problema che sempre più spesso i tecnici incaricati per il consolidamento e/o la ristrutturazione sono costretti ad affrontare. La conoscenza della resistenza del calcestruzzo è fondamentale per ottenere una valutazione quanto più possibile accurata delle capacità strutturali di un edificio. Metodi di prova in situ possono essere usati per una stima quantitativa della resistenza della struttura da analizzare ma, per fare questo, è necessario stabilire una correlazione rappresentativa tra prove distruttive effettuate sull'edificio (che implicano i carotaggi) e quelle non distruttive. La normativa vigente attualmente lascia discrezionalità ai tecnici sulla scelta dei punti di misura, dando invece indicazioni sul numero di prove invasive necessarie per effettuare un adeguato piano di indagine. Il tentativo di questo studio è volto a verificare l'attendibilità delle formule di correlazione per il calcolo della resistenza a compressione del calcestruzzo partendo dall'indice di rimbalzo e dalla velocità ultrasonora. Per effettuare questo studio è stato preso in esame un edificio di 14 piani di Bari, chiamato Punta Perotti, destinato a demolizione sul quale era possibile effettuare un gran numero di carotaggi. Punta Perotti era inoltre un edificio in calcestruzzo armato esposto da più di 10 anni a condizioni ambientali particolarmente aggressive (vicino al mare e in una zona molto ventilata) e senza murature di tompagno. Sono state prelevate 494 carote (181 di diametro 100mm e 293 di diametro 32mm) da pilastri dell'edificio a differenti piani (-1, 0, 1, 2, 3, 6) dopo aver effettuato le prove non distruttive (ultrasuoni e sclerometria) nei punti in cui sono state prelevate le carote.

Sono state analizzate alcune formule di correlazione tra le misure degli indici di rimbalzo e velocità ultrasonore per la valutazione della resistenza a compressione del calcestruzzo (metodo SonReb).

Introduzione

La riclassificazione sismica del territorio italiano derivante dall'emanazione

dell'Ordinanza del Presidente Consiglio dei Ministri (OPCM) n 3274 del 20 marzo 2003, aggiornata nelle Norme Tecniche delle Costruzioni del 14 gennaio 2008, impone il problema del monitoraggio e della verifica dello stato di consistenza del patrimonio edilizio esistente ed in particolare della cosiddetta "edilizia strategica" (tipicamente scuole, ospedali, edifici pubblici, life line, ma anche edifici di particolare valenza storico artistica). Metodi di prova in situ possono essere usati per una stima quantitativa della resistenza della struttura da analizzare ma, per fare questo, è necessario stabilire una correlazione rappresentativa tra prove distruttive effettuate sull'edificio, che implicano i carotaggi, e quelle non distruttive. La normativa vigente attualmente lascia discrezionalità ai tecnici sulla scelta dei punti di misura, dando invece indicazioni sul numero di prove invasive necessarie per effettuare un adeguato piano di indagine.

In Italia, con l'Ordinanza 3274 del 2003 e le sue successive modifiche (OPCM 3431/2005) è stato adottato un sistema normativo, coerente con l'Eurocode 8, in cui è previsto che l'adeguamento o miglioramento sismico comporta lo sviluppo di un processo quantitativo fondato sulle seguenti fasi: conoscenza strutturale, definizione delle prestazioni richieste, valutazione della struttura esistente in riferimento al livello prestazionale attualizzato, progetto di adeguamento e infine valutazione della struttura adeguata.

La valutazione della sicurezza ed il progetto degli interventi sono in genere affetti da un grado di incertezza maggiore di quello delle costruzioni di nuova progettazione, e ciò implica la necessità di elaborare in maniera opportuna i dati relativi alle proprietà dei materiali nelle verifiche di sicurezza, di adottare metodi di analisi e di verifica compatibili con la conoscenza del manufatto e, per quanto possibile, di ricostruire un quadro della struttura portante completo ed affidabile, anche al fine di ridurre il costo complessivo dell'intervento di adeguamento o miglioramento strutturale (A. Masi et al., 2005)(A. Masi, 2007).

Della struttura analizzata è necessario conoscere le norme tecniche utilizzate in fase di progettazione, la pratica costruttiva caratteristica dell'epoca e la sua destinazione d'uso. Per il calcolo delle capacità degli elementi strutturali si utilizzano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, come ottenuti dalle prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive, divisi per

il “Fattore di Confidenza”. Questo ultimo dipende dal livello di conoscenza raggiunto dell’intera struttura.

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza vengono definiti i tre livelli di conoscenza seguenti:

- LC1: Conoscenza Limitata;
- LC2: Conoscenza Adeguata;
- LC3: Conoscenza Accurata.

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono: geometria (ossia le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali), dettagli strutturali (ossia la quantità e disposizione delle armature, la consistenza degli elementi non strutturali collaboranti), materiali (ossia le proprietà meccaniche dei materiali).

Il livello di conoscenza acquisito determina il metodo di analisi ed i valori dei fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali.

Per la conoscenza della resistenza media a compressione del calcestruzzo la suddetta Normativa consente di sostituire alcune prove distruttive (non più del 50%), con un ampio numero (almeno il triplo), di prove non distruttive di documentata affidabilità, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.

La stessa Norma indica nella superficie di piano di 300 mq il numero minimo di carote da estrarre, variabili da tre a nove a seconda del livello di indagine da eseguire (limitato, esteso od esaustivo), e conseguentemente in sostituzione percentuale il numero di prove non distruttive. A parte queste indicazioni generali per la stima della resistenza in situ del calcestruzzo, non esistono procedure consolidate di supporto ai tecnici nell’uso delle metodologie di indagine congiunte (prove distruttive e prove non distruttive). Incerta è l’effettiva correlabilità dei dati che ne derivano, come evidenziato anche in letteratura (G. Fabbrocino et al., 2005) confrontando molteplici dati derivanti dalle indagini su un numero consistente di edifici, le relazioni ipotizzate tra la resistenza a compressione del calcestruzzo ottenuta dai carotaggi e i risultati delle prove non distruttive risultano di non semplice interpretazione e non facilmente comparabili a causa della natura e del numero dei dati.

L’obiettivo è quello di validare l’uso delle prove non distruttive attraverso la individuazione di curve di correlazione attendibili al fine di ridurre il

numero di prove distruttive da effettuare sulla struttura indagata, cioè correlare l'indice di rimbalzo e la velocità ultrasonora con la resistenza a compressione del calcestruzzo. Inoltre è necessario trovare dei metodi affidabili per l'individuazione degli elementi strutturali omogenei da indagare e per la localizzazione delle stazioni di prova, in funzione della riduzione dei fattori soggettivi insiti nel giudizio tecnico emesso in fase di analisi dal professionista incaricato.

Per mettere a punto questo metodo si è pensato di passare attraverso la raccolta di un numero consistente di dati sperimentali derivanti da prove differenziate per tipo e per grandezze fisiche caratteristiche.

L'Enea ha individuato nella struttura di Punta Perotti a Bari, un caso di studio esemplare per la raccolta dati richiesta.

L'edificio, costruito in calcestruzzo armato e sottoposto da più di dieci anni a fattori ambientali particolarmente severi (la prossimità del mare, senza alcun tipo di protezione o rivestimento, senza muri di tompagno) si presentava, poiché destinato ad immediata demolizione, particolarmente idoneo alla esecuzione di prove non distruttive da mettere in correlazione a un numero consistente di prove distruttive (carotaggi).

L'edificio analizzato era costituito da 14 piani fuori terra, un piano interrato, con impalcato tipo di circa 1560 mq.

È stato messo a punto un consistente piano di indagine in base anche ai dettami normativi e alle indicazioni delle linee guida internazionali (ACI 228. 2R -987, 2004), riguardante una tipologia omogenea di elementi strutturali (i pilastri). È stata realizzata una campagna prove avente come risultati, l'estrazione di 494 carote e microcarote e circa un migliaio di prove non distruttive.

Per tutti i campioni prelevati sono state effettuate in laboratorio le prove ultrasonore e le prove meccaniche per la valutazione della resistenza a compressione. I dati ottenuti in campo ed in laboratorio sono stati confrontati ed elaborati.

Il fine ultimo di questo lavoro è stato quello di individuare o perlomeno di iniziare a solcare il cammino di una metodologia di indagine, in grado nel tempo ed attraverso la applicazione ad un numero di casi sempre più vasto,

di produrre protocolli di indagine applicabili alle strutture in calcestruzzo armato.

Emerge tuttavia sempre più chiaramente che l'individuazione di un protocollo di indagine va nella direzione della individuazione di alcune invarianti. Rimane d'altra parte inevitabile tenere in considerazione le caratteristiche peculiari dell'oggetto in esame (l'edificio) caratterizzato per sua natura da un altissimo livello di complessità.

Attività di laboratorio

Le attività in laboratorio sono state condotte per verificare la correlazione tra le prove non distruttive (in particolare gli ultrasuoni) e le prove a compressione di provini cilindrici 10 x 20 cm e 3 x 3 cm estratti con il carotaggio. (N. Labia & F. Lazzaroni, 2007)

Un altro importante scopo è stato quello di verificare la correlazione tra le misure ultrasonore effettuate in laboratorio e quelle in situ.

Inoltre è stata condotta una campagna di misura confrontando diversi strumenti ultrasonori [A. Tatì et al], valutando:

- la loro efficienza e i loro limiti;
- l'influenza dell'operatore sulla misura;
- il tipo di accoppiante utilizzato per il contatto sonda-campione.

Le operazioni svolte in laboratorio sono state:

- Taglio e Rettifica dei provini cilindrici;
- Peso e dimensioni dei campioni;
- Misure ultrasonore;
- Prove meccaniche;
- Redazione Report in Excel e in Access.

Le norme di riferimento applicate alle prove sono state:

- Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza alla compressione dei provini UNI EN 12390-4:2002
- Calcestruzzo indurito. Rilievi microsismici mediante impulsi d'onde vibrazionali ad alta frequenza, in campioni o strutture di calcestruzzo semplice, armato o precompresso. UNI 9524:1989 + A1:1992

In laboratorio molte microcarote sono state tagliate e rettificate ottenendo dei provini cilindrici, aventi un rapporto altezza/diametro 1. Quindi dalle 293 microcarote sono state ottenute 654.

Le misure sono state effettuate su 181 carote standard e 654 carote piccole per un totale di 835 campioni. Le misure ultrasonore effettuate ammontano a circa 7515 misure ultrasonore, utilizzando tre diversi strumenti di misura. Inoltre nel C.R. ENEA Trisaia sono state effettuate delle indagini radiografiche su alcuni pilastri, prelevati sempre dallo stesso sito. Le radiografie sono state svolte utilizzando due distinte tecniche radiografiche, tradizionale e quella con schermi al fosforo. Quest'ultima tecnica prevede una sorgente di raggi X di potenza inferiore per effettuare radiografie e quindi più idonea nel caso di un possibile utilizzo in campo.

Capitolo 1. Linee Guida e prescrizioni normative

1.1 Premessa

E' definita costruzione esistente quella che abbia, alla data della redazione della valutazione di sicurezza o del progetto di intervento, la struttura completamente realizzata.

La problematica della sicurezza strutturale delle strutture esistenti va affrontata individuando le motivazioni tecniche e sociali che rendono gran parte degli edifici potenzialmente a rischio (G. Manfredi et al.). In Italia la qualità delle costruzioni realizzate negli ultimi cinquanta anni è di basso livello rispetto a quelle coeve di altre nazioni. Ciò è dovuto soprattutto all'abusivismo edilizio, che ha prodotto costruzioni realizzate con criteri progettuali insufficienti e materiali scadenti. A questa situazione si aggiunge la scarsa diffusione della cultura della qualità che caratterizza il mondo italiano delle costruzioni.

Per meglio comprendere la dimensione del problema si può far riferimento ad una analisi del CENSIS, riportata nel capitolo "Territorio e Reti" del rapporto annuale 1999. Lo studio ha individuato due categorie di principali di vulnerabilità fisica degli edifici esistenti: degrado per vetustà e degrado per ragioni costruttive. Si accerta l'esistenza di 3.575.000 abitazioni da considerare a rischio statico: di queste il 36,5% per ragioni di anzianità (il 21,5% è costituito da edifici in c.a. con più di 40 anni di vita), ed il 63,5% per cause tecniche, di cui il 19% sono edifici costruiti durante il boom edilizio ed il 44,5% sono edifici abusivi.

Il raggiungimento dei 40 anni di servizio per una struttura in cemento armato rappresenta il superamento di una soglia al di sopra della quale si rendono necessari dei controlli e interventi stringenti ed impegnativi sia dal punto di vista tecnico che economico.

In questo discorso generale sulla situazione del patrimonio edilizio nazionale, non si deve dimenticare che larga parte del territorio è a rischio sismico, ma solo una minoranza degli edifici in tali aree è stato progettato utilizzando criteri antisismici. Infatti, la nuova classificazione sismica

presente nell'allegato 1 dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n°3274, concernente le "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici", pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 20 Marzo 2003 fa sì che il numero dei comuni classificati come sismici in zona 1, 2 e 3 sale da 2965 (pari al 37% dei comuni italiani) del 2001 a 4671 (pari al 58% dei comuni italiani), ampliando in particolare le zone a sismicità più bassa; inoltre l'introduzione di una zona 4 a bassissima sismicità estende a tutto il territorio nazionale l'obbligo di applicare i principi generali di design antisismici.

In particolare, il patrimonio edilizio in cemento armato, realizzato in gran parte negli anni 60 e 70, già nel 1991 rappresentava oltre il 50% del patrimonio edilizio ad uso abitativo. Circa la metà di tale patrimonio era stato costruito prima del 1971, anno in cui le Norme Tecniche specifiche per le zone sismiche previste dalla Legge 1684 del 1962 che quando veniva applicata non dava sostanzialmente indicazioni specifiche sui dettagli costruttivi o requisiti di regolarità atti a garantire il buon comportamento antisismico.

Il processo di valutazione ed adeguamento degli edifici esistenti in cemento armato può essere articolato in 5 fasi(G. Manfredi et al.):

- La conoscenza della struttura in termini di geometria, caratteristica dei materiali strutturali e delle loro condizioni di conservazione.
- La definizione delle prestazioni richieste in termini di pericolosità sismica del sito e livello di protezione sismica accettato.
- La valutazione della struttura esistente che richiede modelli di calcolo e metodi di analisi e verifica che siano compatibili con il comportamento sismico delle strutture esistenti progettate in assenza di specifiche normative.
- Il progetto di adeguamento o miglioramento sismico della struttura in funzione dei vincoli esistenti e delle prestazioni richieste.
- La valutazione della struttura adeguata.

Le problematiche che presentano gli edifici esistenti in c.a. riguardano principalmente l'evoluzione delle Norme nel tempo, quella dei materiali strutturali e i principi di progettazione e di costruzione degli edifici.

1.2 Lo sviluppo della normativa e della pratica progettuale

L'evoluzione della Normativa e della pratica costruttiva e progettuale degli edifici esistenti in c.a. ha naturalmente portato nel tempo alla realizzazione di sistemi strutturali differenti anche a parità di dimensioni globali degli stessi (C. Mariniello, 2007).

Gli edifici di nuova progettazione sono fondati sul principio di tipo semiprobabilistico guidata dalla probabilità di superamento di prefissati livelli prestazionali in modo da soddisfare con la massima prestazione i vari stati limite che può raggiungere durante la sua vita utile. Nella progettazione oggi vige il principio di gerarchia delle resistenze. Gli edifici esistenti sono il frutto di una concezione ingegneristica che è basata su modelli di azioni e di resistenze di tipo deterministico ed in cui la struttura viene verificata solo nei confronti della massima resistenza (in termini puntuali) degli elementi strutturali che la compongono. Adoperando il concetto delle tensioni ammissibili (metodo utilizzato in Italia fino a poco tempo fa), la tensione è calcolata secondo un modello elastico. L'approccio di tipo tensionale non tiene in conto il raggiungimento di "condizioni critiche" anche per effetti deformativi, di perdita di equilibrio o di durabilità. Inoltre la struttura non è intesa nella sua globalità. Non si considerano gli eventuali meccanismi di collasso che si possono sviluppare e le varie combinazioni di carico cui può essere soggetta. In pratica nelle strutture esistenti tutta la progettazione è retta dalle resistenze locali per un solo livello prestazionale (il superamento della tensione ammissibile), mentre per gli edifici di nuova progettazione tutto il processo, retto da un principio semiprobabilistico e prestazionale, è volto a realizzare strutture che possiedono non solo un certo livello di rigidezza e resistenza elastiche per far fronte a terremoti di bassa e media intensità e quindi soddisfare i livelli prestazionali di esercizio, ma anche un certo livello di duttilità sia locale che globale, per far fronte ai sismi di notevole intensità allo stato limite di collasso. Fondamentalmente si può suddividere lo sviluppo della Normativa in due filoni principali che comprendono la progettazione degli edifici secondo regole non sismiche e quindi per soli carichi di tipo gravitazionale

ovvero progettazione degli edifici in una determinata zona sismica e quindi secondo Normative e regole di tipo sismico.

1.3 Gli stati limite

Per stato limite si intende una condizione raggiunta la quale la struttura o una sua parte non è in grado di svolgere determinate funzioni o di soddisfare determinate esigenze di comportamento (G. Manfredi et al.). Indicate con S la sollecitazione e con R la capacità, il metodo semiprobabilistico agli stati limite consente di valutare se e con quale probabilità, in tutte le situazioni che possono manifestarsi nei vari stati limite considerati, risulta $R \geq S$. R e S sono entrambe variabili aleatorie e i valori da utilizzare in sede di verifica si ricavano in base a considerazioni razionali di natura probabilistica.

La valutazione di sicurezza degli edifici esistenti richiede in generale la considerazione di uno stato limite aggiuntivo rispetto a quelli di nuova progettazione, in quanto essi di regola non soddisfano né i principi di gerarchia delle resistenze né posseggono adeguata duttilità, motivo per il quale quando sottoposti alle sollecitazioni indotte da terremoti di elevata intensità, possono, al contrario degli edifici di nuova progettazione, non essere più in grado di assicurare la salvaguardia della vita umana.

I requisiti di sicurezza definiti fanno riferimento allo stato di danneggiamento della struttura definito nell'Ordinanza mediante i seguenti tre stati limite (SL):

SL di Collasso (CO): la struttura è fortemente danneggiata, con ridotte caratteristiche di resistenza e rigidezza laterali residue, appena in grado di sostenere i carichi verticali. La maggior parte degli elementi non strutturali sono distrutti. L'edificio presenta un fuori piombo significativo e non sarebbe in grado di subire senza collassi ulteriori, anche modeste accelerazioni al suolo.

SL di Danno Severo (DS): la struttura presenta danni importanti, con significative riduzioni di resistenza e rigidezza laterali. Gli elementi non strutturali sono danneggiati ma senza espulsione di tramezzi e tamponature. Data la presenza di deformazione residue la riparazione dell'edificio risulta in genere economicamente non conveniente.

SL di Danno Limitato (DL): i danni alla struttura sono di modesta entità senza significative escursioni in campo plastico. Resistenza e rigidezza degli elementi portanti non sono compromesse e non sono necessarie riparazioni. Gli elementi non strutturali presentano fessurazioni diffuse suscettibili di riparazioni di modesto impegno economico. Le deformazioni residue sono trascurabili.

Gli Stati Limite di “Danno Severo” e di “Danno Limitato” corrispondono agli Stati Limite Ultimo e Stati Limite Danno definiti per gli edifici di nuova costruzione, quindi da verificare, rispettivamente, per azioni sismiche che hanno un periodo di ritorno di 475 anni (ovvero 10% di probabilità di superamento in 50 anni) e di 95 anni (ovvero 50% di probabilità di superare in 50anni).

Lo Stato Limite di Collasso corrisponde ad un'azione di progetto più elevata, caratterizzata da una più bassa probabilità di superamento, non superiore al 2% in 50 anni; tale verifica nell'Ordinanza può essere eseguita in alternativa a quella di “Danno Severo” (OPCM 3274).

1.4 Valutazione degli edifici esistenti

Il ritardo culturale presente nel settore dell'ingegneria civile sul tema delle diagnosi, specie se raffrontato con altri settori come quello medico nel quale le indagini, esami, analisi sono ormai patrimonio diffuso e irrinunciabile da parte degli operatori e, cosa ancora più importante, da parte degli utenti committenti.

Le Norme consentono di assumere, nelle verifiche di sicurezza, un adeguato valore del fattore di confidenza in base al livello di conoscenza acquisito della struttura analizzata (G. Manfredi et al.). Questo fornisce al professionista incaricato più opportunità, ma al tempo stesso responsabilizzandolo maggiormente. Infatti, esso si troverà a poter decidere di investire maggiori risorse nelle indagini per la conoscenza della struttura, da recuperare successivamente avendo la possibilità di effettuare interventi di adeguamento più mirati e meno onerosi.

La valutazione degli edifici in c.a. richiede che vengano acquisiti dati sui seguenti aspetti principali:

- Identificazione dell'organismo strutturale ottenuto sulla base dei disegni originali di progetto opportunamente verificati con indagini in situ, oppure con rilievo ex-novo.
- Identificazione delle strutture di fondazione.
- Informazioni sulle dimensioni geometriche degli elementi strutturali, dei quantitativi delle armature, delle proprietà meccaniche dei materiali.
- Informazioni su possibili difetti locali dei materiali.
- Informazione su possibili difetti nei particolari costruttivi (dettagli delle armature, eccentricità travi-pilastro, eccentricità pilastro-pilastro, collegamenti trave-colonna e colonna-fondazione, ecc.).
- Informazioni sulle norme impiegate nel progetto originale.
- Descrizione della destinazione d'uso attuale e futura dell'edificio con identificazione della categoria di importanza ed eventuale rivalutazione dei carichi variabili.
- Informazione sulla natura e l'entità di eventuali danni subiti in precedenza sulle riparazioni effettuate.

Tali dati dovranno essere acquisiti principalmente dalle seguenti fonti di informazione:

- Documenti di progetto.
- Eventuale documentazione acquisita in tempi successivi alla costruzione.
- Rilievo strutturale
- Prove in situ ed in laboratorio.

1.5 Livelli di conoscenza

Per la scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza vengono definiti i tre livelli di conoscenza seguenti (N.T.C., 2008):

- LC1: Conoscenza Limitata
- LC2: Conoscenza Adeguata
- LC3: Conoscenza Accurata

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono:

- geometria, ossia le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali;
- dettagli strutturali, ossia la quantità e disposizione delle armature, la consistenza degli elementi non strutturali collaboranti;
- materiali, ossia le proprietà meccaniche dei materiali.

Il livello di conoscenza acquisito determina il metodo di analisi, ed i valori dei fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali, come indicato nella tabella 1.

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>estese</i> verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure <i>estese</i> prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esauritive</i> verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ oppure <i>esauritive</i> prove in-situ	Tutti	1.00

Tabella 1: Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in cemento armato, acciaio ed acciaio – calcestruzzo (Istruzioni N.T.C. , 2008).

Nel caso si voglia acquisire un livello di conoscenza limitata (LC1) i tre aspetti su elencati vanno trattati nel modo seguente (Istruzioni N.T.C., 2008):

- Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a

campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni.

- **Dettagli costruttivi:** i dettagli non sono disponibili da disegni costruttivi e devono venire ricavati sulla base di un progetto simulato eseguito secondo la pratica dell'epoca della costruzione. E' richiesta una limitata verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti.
- **Proprietà dei materiali:** non sono disponibili informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, né da disegni costruttivi né da certificati di prova. Si adotteranno valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca convalidati da limitate prove in-situ sugli elementi più importanti.

Nel caso si voglia acquisire un livello di conoscenza adeguata (LC2) i tre aspetti su elencati vanno trattati nel modo seguente (Istruzioni N.T.C., 2008]:

- **Geometria:** la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni.
- **Dettagli costruttivi:** i dettagli sono noti da un'estesa verifica in-situ oppure parzialmente noti dai disegni costruttivi originali e incompleti. In quest'ultimo caso è richiesta una limitata verifica in-situ delle armature presenti negli elementi più importanti.
- **Proprietà dei materiali:** informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai disegni costruttivi o dai certificati originali, o da estese verifiche in situ. Nei primi due casi dovranno essere eseguiti limitate prove in situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibile dai disegni o dai certificati originali, dovranno essere eseguite estese prove in situ.

Nel caso si voglia acquisire un livello di conoscenza accurata (LC3) i tre aspetti su elencati vanno trattati nel modo seguente:

- **Geometria:** la geometria della struttura è nota o in base ad un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a

campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni.

- Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti o da un'esaustiva verifica in-situ oppure dai disegni costruttivi originali. In quest'ultimo caso è comunque richiesta una limitata verifica in-situ delle armature presenti negli elementi più importanti.
- Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai disegni costruttivi o dai certificati originali, o a esaustive verifiche in situ. Nei primi due casi dovranno anche essere eseguite estese prove in situ; se i valori ottenuti dei certificati originali, dovranno essere eseguite esaustive prove in-situ.

1.6 Geometria dell'edificio

Lo schema strutturale di un edificio e le dimensioni dei degli elementi strutturali possono essere ricavati come segue:

- Disegni originali di carpenteria
- Disegni costruttivi o esecutivi
- Rilievo visivo
- Rilievo completo

I disegni originali di carpenteria descrivono la geometria della struttura e permettono di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali (G. Manfredi et al.).

Disegni costruttivi o esecutivi descrivono la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettono di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali. In aggiunta essi contengono la descrizione della quantità, disposizione e dettagli costruttivi di tutte le armature, nonché le caratteristiche nominali dei materiali usati.

Rilievo visivo serve a controllare la corrispondenza tra l'effettiva geometria della struttura e i disegni originali di carpenteria disponibili. Comprende il rilievo a campione della geometria di alcuni elementi. Nel caso di modifiche

non documentate intervenute durante o dopo la costruzione, sarà eseguito un rilievo completo descritto al punto seguente.

Rilievo completo serve a produrre disegni completi di carpenteria nel caso in cui quelli originali siano mancanti o si sia riscontrata una non corrispondenza tra questi ultimi e l'effettiva geometria della struttura. I disegni prodotti dovranno descrivere la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettere di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali con lo stesso grado di dettaglio proprio di disegni originali.

1.7 Dettagli Costruttivi

La individuazione dei dettagli costruttivi necessari allo svolgimento di verifiche sugli elementi strutturali può essere ricavata mediante:

- Progetto simulato
- Verifiche in-situ limitate
- Verifiche in-situ estese
- Verifiche in-situ esaustive

Progetto simulato serve, in mancanza dei disegni costruttivi originali, a definire la quantità e la disposizione dell'armatura in tutti gli elementi con funzione strutturale o le caratteristiche dei collegamenti. Deve essere eseguito sulla base delle norme tecniche in vigore e della pratica costruttiva caratteristica all'epoca della costruzione.

Verifiche in-situ limitate: servono per verificare la corrispondenza tra le armature o le caratteristiche dei collegamenti effettivamente presenti e quelle riportate nei disegni costruttivi, oppure ottenute mediante il progetto simulato.

Verifiche in-situ estese: servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali come alternativa al *progetto simulato* seguito da *verifiche limitate*, oppure quando i disegni costruttivi originali sono incompleti. Richiedono che i controlli vengano effettuati su almeno il 15% degli elementi strutturali primari per ciascuna tipologia di elemento (travi, pilastri e pareti).

Verifiche in-situ esaustive: servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3). Richiedono che i controlli vengano effettuati su almeno il 35% degli elementi strutturali primari per ciascuna tipologia di elemento (travi, pilastri e pareti).

Le verifiche in-situ saranno effettuate su un'opportuna percentuale degli elementi strutturali primari per ciascun tipologia di elemento (travi, pilastri, pareti...), come indicato nella tabella 2, privilegiando comunque gli elementi che svolgono un ruolo più critico nella struttura, quali generalmente i pilastri.

	Rilievo (dei dettagli costruttivi) ^(a)	Prove (sui materiali) ^{(b)(c)}
	Per ogni tipo di elemento "primario" (trave, pilastro...)	
Verifiche limitate	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
Verifiche estese	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
Verifiche esaustive	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

Tabella 2: Definizione dei livelli di rilievo e prove per edifici in c.a (Istruzioni N.T.C., 2008)

1.8 Proprietà dei materiali

In genere la valutazione delle proprietà dei materiali in situ è basata su prove dirette generalmente di tipo distruttivo.

La misura delle caratteristiche meccaniche del Calcestruzzo si ottiene mediante estrazione di campioni (carotaggio) ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura.

La misura delle caratteristiche meccaniche delle barre di acciaio si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima, salvo nel caso in cui siano disponibili certificati di prova di entità conforme a quanto richiesto per le nuove costruzioni, nella normativa dell'epoca.

La misura delle caratteristiche meccaniche delle Unioni di elementi in acciaio si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima.

I Metodi di prova non distruttivi sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive. Nel caso del calcestruzzo, si adotteranno metodi di prova che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza.

Prove in-situ limitate servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute o dalle normative in vigore all'epoca della costruzione, o dalle caratteristiche nominali riportate sui disegni costruttivi, o da certificati originali di prova.

Prove in-situ estese: servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova, oppure quando i valori ottenuti dalle prove limitate risultano inferiori a quelli riportati nei disegni o certificati originali.

Prove in-situ esaustive: servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova, oppure quando i valori ottenuti dalle prove limitate risultano inferiori a quelli riportati nei disegni o certificati originali, e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3).

Le prove richieste nei diversi casi sono indicate nella tabella 2

In riferimento alle percentuali di elementi da verificare in-situ ad al numero di provini da estrarre e sottoporre a prove di resistenza, le quantità riportate nella tabella 2 hanno valore indicativo e debbono essere adattate ai singoli casi, tenendo conto dei seguenti aspetti (G. Manfredi et al.):

- I. Nel controllo del raggiungimento delle percentuali di elementi indagati ai fini del rilievo dei dettagli costruttivi si terrà conto delle eventuali situazioni ripetitive, che consentono di estendere ad una più ampia percentuale i controlli effettuati su alcuni elementi

strutturali facenti parte di una serie con evidenti caratteristiche di ripetitività per uguale geometria e ruolo nello schema strutturale.

- II. Le prove sugli acciai sono finalizzate all'identificazione della classe di acciaio utilizzata con riferimento alla normativa vigente all'epoca di costruzione. Ai fini del raggiungimento del numero di prove sull'acciaio necessario per il livello di conoscenza è opportuno tener conto dei diametri di più diffuso impiego negli elementi principali con esclusione delle staffe.
- III. Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.
- IV. Il numero di provini riportato nella tabella 2 potrà essere variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale. Nel caso del calcestruzzo in opera tali caratteristiche sono spesso legate alle modalità costruttive tipiche dell'epoca di costruzione e del tipo di manufatto, di cui occorrerà tener conto nel pianificare le indagini. Sarà opportuno, in tal senso, prevedere l'effettuazione di una seconda campagna di prove integrative, nel caso in cui i risultati della prima risultino fortemente disomogenei.

1.9 Piano delle indagini

Al fine di ottenere un quadro di informazioni soddisfacente è utile articolare le attività di indagine in due fasi: indagini preliminari e indagini dettagliate (G. Manfredi et al.).

Durante le indagini preliminari vanno ricercate le seguenti informazioni sulla struttura:

- 1. Periodo di progettazione e periodo di costruzione: sarà in tal modo possibile individuare le norme e la manualistica.
- 2. Elaborati di progetto e di collaudo.

3. Ricostruzione della storia relativa alle eventuali variazioni d'uso e allo stato di manutenzione, oltre che degli eventi sismici e/o altri eventi di particolare rilievo che hanno interessato la struttura.
4. Presenza di eventuali condizioni di danno e/o degrado e la loro evoluzione nel tempo (quando sono state notate per la prima volta, se qualche contromisura è stata attuata, con quale risultato, ecc.)
5. Presenza di corpi aggiunti e/o di sopraelevazioni successive alla costruzione originaria.
6. Destinazione d'uso attuale ed eventuali previsioni di cambiamento.

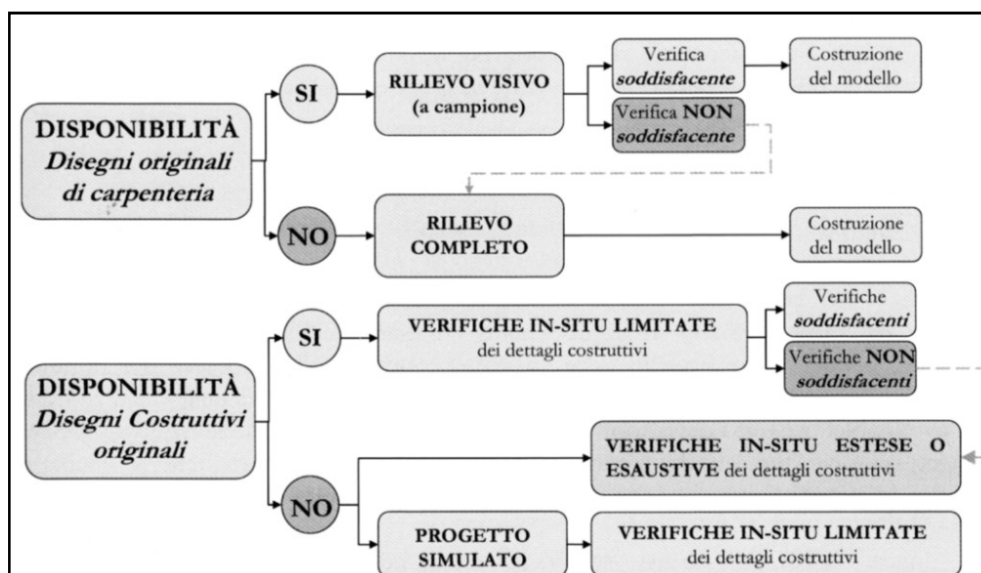


Figura 1: Impostazione di una campagna di prove (G. Manfredi et al.)

L'impostazione e l'estensione della campagna di indagine dipende innanzitutto dalla disponibilità, completezza ed affidabilità degli elaborati di progetto originali (carpenterie e dettagli costruttivi), come schematizzato nei diagrammi di flusso riportati in figura 1, per l'individuazione della geometria della struttura e dei dettagli costruttivi.

1.10 Gli elaborati di progetto

La valutazione della sicurezza degli edifici esistenti in c.a. è certamente più complessa della progettazione ex-novo in quanto si deve operare su strutture delle quali, in genere, si ha una conoscenza limitata.

E' importante ricordare che il progetto strutturale dell'edificio spesso non risulta disponibile in quanto la norma vigente fino al 1971, il R.D. n°2229 del 16 novembre 1939, prevedeva soltanto l'obbligo per il costruttore di presentare, prima dell'inizio dei lavori, denuncia alla Prefettura della provincia, allegando una copia del progetto di massima, il quale non conteneva alcun dettaglio ma soltanto dimensioni e caratteristiche principali dell'edificio da realizzare. Al termine dei lavori, per ottenere la licenza di uso della costruzione, il committente doveva poi presentare il certificato di collaudo delle opere alla Prefettura (G. Manfredi et al.).

Soltanto in seguito alla legge del 5 novembre 1971, n°1086, "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica" è stato disposto, all'art. 4, l'obbligo di depositare il progetto esecutivo ed i calcoli statici presso l'ufficio competente del Genio Civile (ora sostituito dal corrispondente Ufficio Regionale) all'atto della denuncia dei lavori. La legge 1086/71 prevede un iter per l'esecuzione di un'opera, articolato formalmente in quattro passi principali:

- denuncia delle opere;
- relazione a struttura ultimata;
- nomina del collaudatore;
- collaudo statico.

Se per gli edifici costruiti prima del 1971, ovvero prima dell'entrata in vigore della legge 1086/71, la probabilità di reperire la documentazione tecnica è molto bassa, l'esperienza mostra come anche nel decennio successivo la suddetta documentazione, sempre che sia disponibile, risulti essere frequentemente incompleta o poco accurata. Pertanto, l'individuazione della quantità e disposizione delle armature può costituire un grosso problema per la cui soluzione è necessario adottare particolari procedure ad hoc che consentono di individuare i dettagli costruttivi in maniera sufficientemente affidabile ma non eccessivamente onerosa. In tal

senso il progetto simulato può essere uno strumento importante per la conoscenza della struttura.

1.11 Campagna di Rilievo

La campagna di rilievo può essere svolta a livelli di approfondimento differenti, in virtù della disponibilità di elaborati di progetto originali e del livello di conoscenza prescelto (G. Manfredi et al.). In ogni caso bisogna procedere ad un preliminare ed attento esame delle condizioni attuali, considerando i seguenti aspetti principali:

1. stato generale di manutenzione e conservazione con ispezioni visive all'esterno ed all'interno dell'edificio, ispezionando anche sottotetto e seminterrato ove la struttura è spesso "a vista" in quanto non intonacata;
2. stato ed aspetto superficiale del calcestruzzo (colorazioni insolite, presenza di depositi dovuti a reazioni chimiche, porosità, segni di segregazione degli inerti ecc.);
3. presenza di zone particolarmente degradate e/o danneggiate;
4. espulsione del copri ferro (in tal caso oltre a valutare il livello di ossidazione delle armature scoperte si potrà valutare se esse siano costituite da barre lisce o ad aderenza migliorata);
5. disgregazione superficiale del calcestruzzo (ad esempio rottura degli spigoli di elementi strutturali come pilastri, sbalzi e cornicioni, ecc.);
6. distacco dei pannelli di tamponatura dalle maglie strutturali;
7. interazione tra struttura ed impiantistica (soprattutto nel caso di edifici vetusti gli impianti possono aver subito molteplici interventi di rifacimento con conseguenze spesso gravi per la consistenza degli elementi strutturali: ad esempio condotti dell'impianto di riscaldamento che attraversano gli elementi strutturali);
8. presenza di lesioni strutturali e non strutturali;
9. presenza di lesioni nelle pavimentazioni;
10. presenza ed entità di interventi di riparazione e qualità del loro collegamento alla struttura esistente;

11. evidenza di dissesti nel terreno di fondazione e/o nelle zone circostanti.

1.12 Saggi e Prove per individuare le caratteristiche dei dettagli costruttivi

I sondaggi dovranno essere decisi in numero e caratteristiche tali da ottenere le seguenti informazioni (G. Manfredi et al.):

- per i pilastri il passo e il diametro delle staffe, quantità e disposizione delle armature longitudinali;
- per le travi il passo e il diametro delle staffe, quantità e disposizione delle armature longitudinali;
- per i solai l'orditura, l'interasse tra le nervature, le armature principali e le armature di ripartizione;
- per le tamponature la tipologia e le caratteristiche degli elementi utilizzati (laterizi forati, pieni, blocchi in calcestruzzo, ecc.), spessore, numero strati, presenza di intercapedini;
- per le fondazioni la tipologia e il piano di posa.

L'estensione dei saggi da realizzare sarà condizionata essenzialmente dal livello di conoscenza prescelto dal professionista, come stabilito dalle Norme Tecniche.

1.12.1 Individuazione delle armature e dei dettagli costruttivi

La localizzazione delle armature presenti negli elementi strutturali e la stima del loro diametro e dello spessore del copri ferro può essere effettuata mediante indagini in dirette, ovvero mettendo a nudo le armature in alcune parti degli elementi strutturali rimuovendo il copri ferro presente (G. Manfredi et al.). In alternativa, o a loro integrazione, possono essere adoperati metodi non distruttivi basati su prove con congegni elettromagnetici, radiografia e metodi Radar.

I metodi elettromagnetici, ed in particolare quello basato sull'induzione elettromagnetica o per le strumentazioni più recenti sul principio delle

correnti parassite (pacometri) sono sicuramente più diffusi in virtù dei costi limitati e dalla facilità di applicazione. La radiografia comporta costi maggiori in virtù della richiesta di personale particolarmente specializzato e della necessità di proteggersi adeguatamente dalle radiazioni. I metodi radar risultano vantaggiosi quando la profondità delle barre è molto elevata (fino a 50 cm) situazione nella quale i metodi precedentemente descritti non risultano utilizzabili ma alquanto rara negli edifici ordinari.

Il pacometro è uno strumento che, utilizzando un rilevatore di metalli ferrosi, consente di indagare in maniera non distruttiva le caratteristiche delle armature di acciaio presenti nella struttura in c.a.. In particolare, esso consente di localizzare la posizione delle barre e di stimare il diametro delle stesse o lo spessore del copri ferro. Esso è costituito essenzialmente da una sonda e da un visore analogico digitale che visualizza il valore rilevato.

1.13 Progetto Simulato

Quando la documentazione tecnica non sia disponibile o insufficiente ed il livello di estensione delle indagini sia limitato, i dettagli costruttivi possono essere definiti sulla base di un progetto simulato, eseguito secondo la pratica dell'epoca della progettazione (G. Manfredi et al.). Esso, affiancato da una limitata verifica in-situ delle armature e dei dettagli costruttivi presenti negli elementi più importanti, darà luogo ad un quadro di dati tali da consentire verifiche locali di resistenza.

Importante è la conoscenza del periodo di progettazione e costruzione dell'edificio, sulla base del quale è possibile impostare il percorso di conoscenza della struttura facendo riferimento alle seguenti fonti principali di informazione:

- normative tecniche vigenti all'epoca della progettazione/costruzione;
- manualistica autorevole di comune utilizzo nel periodo in esame;
- consuetudini progettuali (progetti tipici del periodo) e costruttive.

I passi fondamentali della progettazione simulata di un edificio esistente possono essere così sintetizzati:

1. *Individuazione dell'età di progettazione e costruzione.* L'importanza dell'età di progettazione e costruzione è già stata sottolineata con

riferimento alle fonti di informazione. E' però opportuno porre attenzione ad individuare correttamente l'anno di progettazione in modo distinto da quello di realizzazione. Spesso è possibile trovare edifici progettati e realizzati secondo i dettami di una normativa diversa da quella vigente al momento dell'effettiva realizzazione.

2. *Individuazione e studio dello schema strutturale.* La corretta individuazione dello schema strutturale è la premessa indispensabile per effettuare il progetto simulato dell'edificio in esame, il cui obiettivo è quello di individuare i dettagli costruttivi (quantità e disposizione delle armature) partendo dalle dimensioni ricavate attraverso opportune operazioni di rilievo degli elementi strutturali. Un attento rilievo dell'organismo strutturale richiede l'individuazione e collocazione di tutti gli elementi strutturali. In particolare dovranno essere individuate, almeno, le seguenti caratteristiche:
 - Solai: orditura , dimensioni ed interasse dei travetti, presenza delle fasce piene e/o semipiene, tipologia e dimensioni delle pignatte, spessore della soletta.
 - Travi: dimensioni e direzione, eventuale presenza di nodi trave-trave, localizzazioni di travi a spessore.
 - Pilastri: dimensioni, tipologia dei collegamenti con altri elementi strutturali (travi a ginocchio, pareti, ecc.), entità delle eventuali rastremazioni lungo l'altezza.
 - Tipo di copertura (piana o a falda, con telai in c.a., capriate in acciaio, ecc.)
 - Eventuali altri elementi (ad esempio pareti in c.a.) e loro collegamento con gli altri elementi strutturali.
3. *Scelta del modello di calcolo.* La scelta dei modelli di calcolo da assumere nella progettazione simulata deve tener conto di quelle che erano le consuetudini e le possibilità operative del periodo. In particolare è da ricordare che in passato le strutture in c.a. ubicate nei territori non classificati sismici venivano progettate per soli carichi verticali considerando schemi di calcolo estremamente semplificati in virtù anche delle difficoltà oggettive ad analizzare schemi più complessi come quelli oggi usuali con i codici di calcolo

implementati sui moderni PC. Pertanto venivano utilizzati modelli semplici come, ad esempio, quello di trave continua su più appoggi o addirittura di sequenze di travi semplicemente appoggiate per progettare intere travate. I pilastri venivano dimensionati in genere considerando solo lo sforzo normale centrato.

4. *Valutazione dei carichi.* La scelta dei valori dei carichi permanenti e di esercizio deve essere condotta in modo coerente con la filosofia e la destinazione d'uso del progetto originario. I carichi valutati in tal fase possono essere differenti da quelli da considerare nelle successive operazioni di valutazione sulla struttura ottenuta dal progetto simulato.
5. *Progetto delle armature e verifica degli elementi strutturali.* Per portare a termine la progettazione è necessario adottare dei valori di riferimento per le resistenze dei materiali. In tale fase non vanno adoperati i valori ottenuti dalle indagini in-situ, ma le resistenze di calcolo dei materiali devono essere assunte con riferimento ai valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca e della zona in cui è collocato l'edificio.
6. *Indagini in situ.* Il progetto delle armature condotto secondo i criteri sopra richiamati dovrà essere verificato mediante sondaggi a campione da condurre sugli elementi strutturali, conformemente con quanto previsto dal livello di conoscenza LC1.
7. *Revisione del Progetto Simulato.* Il passo finale è la correzione, eventuale, dei dettagli di armatura progettati come sopra descritto, alla luce delle evidenze emerse dai sondaggi. Il risultato finale delle operazioni di progetto simulato è la redazione di tavole progettuali degli elementi strutturali primari dell'edificio in esame, contenenti le caratteristiche ed i dettagli costruttivi necessari a condurre le verifiche di resistenza.

Capitolo 2. Prove non distruttive propedeutiche alla valutazione degli edifici esistenti

2.1 Indagine pacometrica

I metodi magnetici utilizzano le proprietà magnetiche dell'acciaio e vengono di solito utilizzati per il rilievo delle barre di armatura all'interno dei getti di calcestruzzo (D'Aria, 2004).

L'indagine non distruttiva per la localizzazione delle armature nei getti di calcestruzzo è l'indagine pacometrica. Essa utilizza uno strumento portatile (pacometro) di impiego estremamente rapido, semplice e sicuro.

Questo metodo si avvale del principio della misurazione dell'assorbimento del campo magnetico, prodotto dalla stessa apparecchiatura, che viene evidenziato tramite sistema analogico o digitale (in alcune apparecchiature più sofisticate è anche acustico).

Finalità dell'indagine.

Spesso si opera su manufatti per i quali non si hanno dati sulla disposizione delle armature, sull'esecuzione delle strutture e sulle caratteristiche dei materiali e il quesito che il più delle volte viene posto, agli specialisti del settore, è quello di conoscere l'effettiva disposizione delle barre di armatura, il loro numero, il loro diametro e la misura del copriferro senza danneggiare la struttura in esame. Quindi per eseguire indagini per verificare la corretta posa in opera delle barre d'armatura, oppure per eseguire un controllo di qualità e stimare le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, mediante prove distruttive e/o non distruttive, è fondamentale collocarsi in una posizione dove non ci siano barre di armatura, al fine di non vanificare il significato delle indagini.

Infatti, tutte le stazioni di misura andranno fissate dopo aver individuato la posizione delle armature principali e delle staffe in modo da escluderle dalla superficie di prova (per l'indagine sclerometrica), dal percorso delle onde elastiche (per l'indagine ultrasonica) e dalla zona dove eseguire il prelievo del campione cilindrico di calcestruzzo.

Descrizione dello strumento e sue caratteristiche.



Figura 2: Pacometro

Lo strumento, composto da un'unità di emissione e lettura del campo elettromagnetico, da una o più sonde emittenti-riceventi il campo magnetico e da eventuali spessori di materiale paramagnetico, consente una ricostruzione affidabile delle armature, soprattutto quando si intende controllarne le modalità di posa in opera.

Il pacometro permette di determinare la posizione, la direzione ed il numero delle barre di armatura principali e secondarie, fornisce la misura del copriferro fino a circa nove centimetri, valuta il diametro delle barre di armatura, rileva la presenza di oggetti metallici, quali tubazioni, cavi elettrici, tiranti e può essere utilizzato per la localizzazione di cordoli, architravi, travi e pilastri (immersi nelle murature), nervature di solai non visibili, ecc ...

Due sonde, una di superficie ed una di profondità, aventi differenti caratteristiche consentono a questo strumento di risolvere in modo sicuro anche problemi più complessi di localizzazione e misurazione. La sonda di superficie localizza esattamente le barre di armatura in disposizioni estremamente complesse e dense e misura il copriferro con errori minimi, anche con barre di diametri non conosciuti o su gruppi di barre.

Nel campo da 0 a 6 cm di copriferro, è preferibile usare la sonda di superficie perché il suo potere di analisi è quasi doppio rispetto all'altra.

E' invece indispensabile usare la sonda di profondità per coperture oltre i 6 cm di copriferro.

Modalità di impiego.

La messa in servizio della strumentazione si effettua tenendo la sonda prescelta, lontano dagli oggetti metallici e quindi, dopo aver chiuso il circuito di misura premendo un tasto dell'apparecchiatura, si ottiene l'azzeramento della stessa.

Per individuare la presenza delle barre, la sonda, in un primo tempo, le magnetizza brevemente e quindi ne rivela il campo magnetico indotto man mano che questo si dissolve. La forza del campo indotto dipende essenzialmente dalla distanza della barra dalla sonda di ricerca e, in misura minore, dal suo diametro.

La sonda di ricerca contiene due bobine. Quando ricevono un impulso di corrente, queste bobine creano un campo magnetico che magnetizza la barra di armatura e vi induce delle correnti parassite (correnti Foucault). Esaurito l'impulso di corrente, le correnti parassite si dissolvono creando un campo magnetico di intensità molto ridotta quale "eco" dell'impulso iniziale. Le bobine contenute all'interno della sonda misurano la forza del campo indotto man mano che questo si dissolve e tale segnale viene poi elaborato per fornire la misura della profondità della barra.

L'eco delle correnti parassite proveniente dalla barra di armatura non è determinata esclusivamente dal diametro della barra e dalla distanza di quest'ultima dalla sonda, ma anche dall'orientamento della sonda rispetto alla barra da cui si risale alla direzione delle armature.

Gli strumenti che utilizzano il principio operativo delle *eddy current* (correnti parassite) non sono soggetti a molteplici problemi derivanti da fattori dovuti a condizionamenti fisici, ambientali, e dalle caratteristiche intrinseche del materiale indagato.

Infatti, non presentano problemi di interferenze elettriche, magnetiche, termiche e non vi sono condizionamenti dovuti agli effetti ionici dell'umidità nel calcestruzzo non stagionato.

La precisione e la ripetibilità, sono ulteriori caratteristiche che producono prestazioni impareggiabili sotto tutti i profili.

Per la determinazione della posizione dei ferri, muovendo la sonda si "spazzola" la superficie in esame. Individuata la posizione di assorbimento, si ruota lentamente la sonda fino ad identificarne la direzione di massimo assorbimento che corrisponde a quella di orditura dell'armatura.

Per la determinazione del diametro della barra, l'operazione è più complessa e richiede l'esecuzione di almeno due misurazioni.

2.2 Indagine sclerometrica

2.2.1 Generalità

L'indagine sclerometrica consente di stimare la durezza superficiale del calcestruzzo e, attraverso curve di correlazione appropriate, la sua resistenza a compressione su strutture già realizzate (D'Aria, 2004).

Il nome dell'indagine deriva dallo strumento utilizzato per eseguire le prove: lo sclerometro (Fig. 3). Tale strumento misura la durezza d'urto che è strettamente legata alla resistenza a compressione del calcestruzzo.

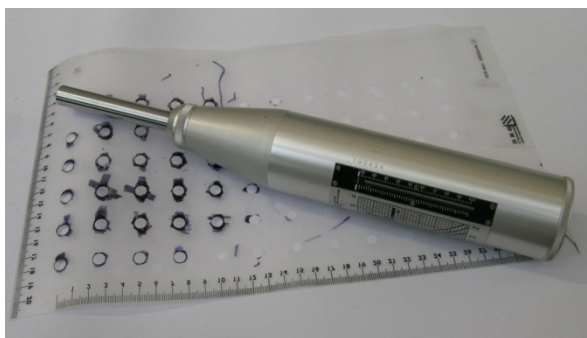


Figura 3: Sclerometro per calcestruzzo

L'indagine sclerometrica non ha la pretesa di sostituire la prova per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo consistente nella esecuzione di un carotaggio con successivo schiacciamento della carota prelevata, ma si pone l'obiettivo della stima della resistenza a compressione del calcestruzzo mediante anche una curva sperimentale di taratura.

E' necessario elaborare curve di taratura per ciascuna classe di resistenza del calcestruzzo.

L'indagine sclerometrica non potendosi sostituire integralmente alla determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo mediante prova distruttiva a compressione viene anche utilizzato per effettuare una valutazione dell'uniformità del calcestruzzo in sito allo scopo di delineare zone od aree caratterizzate dalla presenza di calcestruzzo di scarsa qualità o deteriorato.

L'indagine sclerometrica stima la resistenza del calcestruzzo con una precisione abbastanza grossolana intorno al 15-20% ed è fortemente influenzata dalla disomogeneità e non isotropicità del calcestruzzo.

I fattori che influenzano l'indagine sclerometrica sono:

- Carbonatazione del calcestruzzo provoca un indurimento dello strato superficiale e determina una sovrastima anche del 50% del valore della resistenza a compressione;
- Contenuto di cemento elevato determina una sottostima della resistenza a causa della maggiore deformabilità superficiale del calcestruzzo mentre, viceversa, per contenuti bassi il calcestruzzo risulta meno deformabile per effetto della resistenza offerta dagli aggregati;
- Età del calcestruzzo, a causa della maturazione del calcestruzzo e dell'esposizione agli agenti esterni, influenza notevolmente la durezza superficiale;
- Posizione all'interno della struttura del punto di misura, come ad esempio la quota del getto di calcestruzzo, influisce sulla stima della resistenza a causa della stratificazione della miscela che comporta un ingranamento degli inerti nelle zone più basse della struttura ed un incremento del rapporto acqua/cemento in quelle alte;
- Rapporto acqua/cemento riduce la stima della resistenza all'aumentare del rapporto;
- Superficie del calcestruzzo, la cui tipologia influenza notevolmente la stima della resistenza ad esempio superfici dure realizzate attraverso casseri in materiale assorbente conducono ad una sovrastima così come superfici ben levigate e lavorate a mano;
- Tessitura del calcestruzzo influisce sulla applicazione dell'indagine in quanto sono richieste tessiture chiuse in modo da avere superfici

uniformi. L'indagine sclerometrica non si può effettuare su calcestruzzi con tessitura aperta;

- Tipo di aggregato influenza la resistenza del calcestruzzo che dipende dal tipo di inerti impiegati pertanto è necessario effettuare specifiche tarature quando si utilizzano aggregati particolari quali scisti o pomice che tendono a sovrastimare la resistenza;
- Tipo di cemento anch'esso condiziona notevolmente la stima della resistenza ed è pertanto necessario effettuare tarature specifiche relative al cemento impiegato infatti l'utilizzo di cementi alluminosi porta ad una sovrastima anche del 100% se si usano, ad esempio, curve di taratura ottenute per cementi Portland;
- Umidità del calcestruzzo a cui il calcestruzzo ordinario è notevolmente sensibile con riduzioni anche del 20% sulla resistenza tra un calcestruzzo umido rispetto ad uno asciutto.

2.2.2 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento dello sclerometro è semplicissimo: una massa di peso noto viene scagliata, attraverso una potente molla, contro un percussore a contatto con la superficie di calcestruzzo da esaminare. Il percussore, per effetto della reazione fornita dalla superficie del calcestruzzo, rimbalza indietro e, contemporaneamente, muove un indice che scorre su una scala graduata (D'Aria, 2004).

Il valore raggiunto dall'indice sulla scala graduata viene chiamato indice di rimbalzo, il quale rappresenta una misura della durezza superficiale del calcestruzzo esaminato.

La durezza superficiale viene successivamente correlata, mediante relazioni empiriche o basate su metodi semiprobabilistici, alla resistenza a compressione del calcestruzzo.

La stima della resistenza avviene attraverso una correlazione che richiede necessariamente la determinazione di una curva sperimentale di taratura.

La correlazione tra l'indice di rimbalzo I_m e la resistenza a compressione del calcestruzzo R_c è del tipo:

$$R_c = A \times I_m^B$$

dove A e B sono due parametri dipendenti dalle caratteristiche del calcestruzzo e I_m è l'indice medio di rimbalzo, calcolato come media degli indici di rimbalzo di tutte le misurazioni effettuate.

La determinazione della curva sperimentale di taratura tra resistenza a compressione del calcestruzzo avviene mediante la contemporanea misurazione dell'indice di rimbalzo e determinazione della resistenza a compressione attraverso prova di schiacciamento eseguita con una pressa.

I provini di taratura saranno confezionati secondo al UNI EN 12390-1:2002 e, a stagionatura di 28 gg avvenuta, compressi, prima di essere schiacciati, tra i piatti della pressa con una sollecitazione di almeno 1 N/mm² per effettuare le misurazioni dell'indice di rimbalzo (almeno nove misurazioni per ciascuna delle due facce opposte lasciate libere dall'apparecchio di prova).

La resistenza a compressione dei provini verranno determinate successivamente secondo la UNI 6132:1972.

La variazione della resistenza del calcestruzzo si può ottenere variando il rapporto acqua/cemento.

Il campione statistico per essere valido dovrà essere costituito da almeno 30 provini relativi ad almeno tre differenti valori del rapporto acqua/cemento.

Per ciascuno dei provini testati si ottengono punti sperimentali costituiti da una coppia di valori di indice medio di rimbalzo, rappresentativo della durezza superficiale del calcestruzzo, e di resistenza a compressione.

Riportando ciascuna coppia di valori su di un sistema cartesiano, dove in ordinata si riporta la resistenza a compressione ed in ascissa l'indice medio di rimbalzo di ciascun provino, si avranno una serie di punti che si addensano lungo una curva che è la curva sperimentale di taratura.

Si può costruire un fuso determinato da due curve ottenute, rispettivamente, sottraendo e sommando alla curva sperimentale di taratura lo scarto quadratico medio ottenuto dai valori sperimentali determinati. In tale fuso sono compresi generalmente il 75-80% dei punti sperimentali.

La curva sperimentale di taratura è determinata mediante una direzione d'urto orizzontale e pertanto, per giaciture della superficie di calcestruzzo da testare diverse da quella verticale, è necessario correggere la misurazione depurandola del peso del martello.

Ogni ditta costruttrice di sclerometri fornisce in dotazione con lo strumento una serie di curve di taratura per alcuni angoli di inclinazione ed inoltre i valori degli errori probabili commessi dallo strumento (esempio in fig.4).

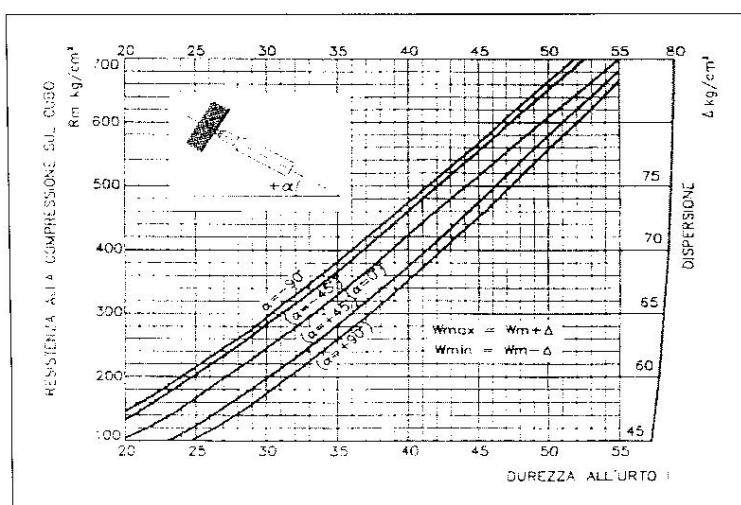


Figura 4: Curve di taratura in dotazione allo sclerometro (D'Aria, 2004)

2.3 Apparecchio ad ultrasuoni per il conglomerato cementizio

L'impiego degli ultrasuoni per applicazioni ad elementi in conglomerato cementizio rientra tra i controlli non distruttivi.

Con i controlli non distruttivi (non destructive testing o non destructive evaluation), com'è noto, le caratteristiche ricercate vengono messe in evidenza o misurate sulla struttura attraverso l'influenza che esse esercitano su alcune proprietà fisiche del materiale. Questa metodologia non altera i materiali nelle loro caratteristiche (G. Menditto, 2004).

Nel caso specifico del conglomerato cementizio il metodo ultrasonico è utilizzato per valutare la omogeneità in situ e stimare la resistenza degli elementi strutturali. I pionieri del metodo ultrasonico sono stati F.A. Firestone negli U.S.A. (1940) e CH Desch, D.o. Sproule, w.J. Dawson in Inghilterra. Verso la fine degli anni quaranta impiegavano ultrasuoni per controlli non distruttivi W.J. Chessmann e R. Jones.

Il metodo si basa sulla determinazione della velocità di transito degli ultrasuoni attraverso il materiale, nonché sull'esame del segnale ricevuto, opportunamente visualizzato.

La grandezza che viene misurata (in microsecondi) è il tempo di transito (t) degli impulsi ultrasonici (detto anche tempo di volo - TOF: time offlight) impiegato a percorrere la distanza geometrica (s in mm) tra punti di rilievo sull'unità da saggiare. Il *parametro non distruttivo* è la velocità (V) virtuale o apparente,

$$V = \frac{s}{t}$$

dove s viene misurata in metri e t in microsecondi μS . Un $\mu s = 10^{-6}$ sec.

Pertanto

$$V = s(m)/10^{-6}(sec) = 10^6 s/t \text{ m sec}^{-1}$$

Per la misura di t viene richiesta una precisione di $\pm 1 \%$.

L'apparecchio ad ultrasuoni per il calcestruzzo (fig. 5), di cui la fig. 6 riproduce un diagramma a blocchi è sostanzialmente costituito da:

- un dispositivo che a comando emette impulsi di vibrazioni meccaniche (emettitore o sonda emittente) in sincronismo con un segnale elettrico. Il generatore di impulsi è costituito da un thyatron (valvola rettificatrice a griglia pilota) il quale carica il condensatore che, a sua volta, scaricando improvvisamente, genera l'impulso.
- Sull'uscita è collocata una resistenza che regola l'ampiezza e contemporaneamente anche la durata dell'impulso. Un sincronizzatore emette, con frequenza prefissata, il segnale necessario a comandare l'emissione di un impulso e l'inizio di un ciclo di scansione. L'emettitrice oltre ad avviare un'unità di misura di intervalli di tempo attiva un'unità di visualizzazione della vibrazione in ricezione.

- un dispositivo che, ricevendo le vibrazioni meccaniche, le trasforma in segnali elettrici (ricevitore o sonda ricevente);
- un dispositivo di amplificazione regolabile e di trattamento del segnale emesso dalla sonda ricevente;
- un dispositivo elettronico di misura dell'intervallo di tempo fra istante di emissione ed istante di ricezione dell'impulso o della parte di esso che si analizza.

L'impulso di vibrazione che perviene alla sonda ricevente, trasformato in un segnale elettrico, opportunamente amplificato, viene visualizzato sullo schermo a raggi catodici (CRT, apparecchio tradizionale) o su uno schermo a cristalli liquidi (moderni apparecchi digitali) o equivalente di un oscilloscopio. Sullo schermo dell'oscilloscopio il segnale elettrico, eventualmente filtrato entro bande preselezionate, viene rappresentato in modo da misurare il tempo (t) intercorso tra l'emissione e la ricezione, ed in modo da valutare altri importanti parametri (frequenza, ampiezza, smorzamento, riflessione, etc.). E' opportuno che sull'oscilloscopio vengano visualizzati anche gli istanti di partenza e di arresto dell'unità di misura dell'intervallo di tempo, per una mutua precisa correlazione ed una continua verifica da parte dell'operatore. Il calcestruzzo cementizio presenta buone caratteristiche di trasmissione delle onde elastiche ed una velocità di propagazione intorno ai 400 msec^{-1} in uno spettro che arriva fino a 50 kHz. I segnali utilizzati per le prove sui calcestruzzi, a differenza di quelli correnti nel controllo dei metalli, sono di tipo impulso e quindi a banda molto larga.

Si preferisce usare impulsi a frequenze ultrasoniche (20 + 150 Hz) fondamentalmente per due ragioni:

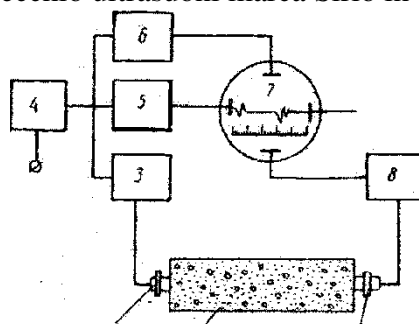
- a) per produrre un impulso con una partenza netta, il che equivale ad una migliore precisione nella misura del tempo;
- b) per produrre l'energia meccanica di vibrazione massima nella direzione di propagazione, ovvero avere la massima sensibilità.

Per gli impieghi più usuali (per spessori fino ad un massimo di 3 m) vengono consigliati trasduttori con frequenza di 50 + 60 KHz.

In genere per questi tipi di controllo non si usano ultrasuoni di frequenza più elevata perché altrimenti le lunghezze d'onda sarebbero di molto



Figura 5: Apparecchio ultrasuoni marca Sirio in dotazione ENEA



1. campione di calcestruzzo
2. sonda emittente o emettitore
3. generatore degli impulsi
4. oscillatore pilota
5. dispositivo di spostamento
6. oscillatore marcatempo
7. tubo a raggi catodici
8. amplificatore
9. ricevitore o sonda ricevente

Figura 6: Diagramma a blocchi dell'apparato ultrasonoro (G. Menditto)

inferiori alle discontinuità naturali del calcestruzzo e l'onda verrebbe rapidamente smorzata nel materiale stesso. Inoltre vi sarebbero gravi problemi di accoppiamento fra trasduttori e materiali.

2.3.1 Principi sulla generazione e sulla ricezione degli ultrasuoni. Generazione degli impulsi. effetto piezoelettrico ed effetto elettrostrittivo

Per generare ultrasuoni occorre (G. Menditto, 2004):

- un corpo in grado di vibrare a frequenze superiori a quelle percepibili dall'orecchio umano;
- trovare un modo per indurre tali frequenze in quel corpo vibratile.

A tal scopo, a seconda delle modalità di generazione di onde meccaniche, sono disponibili *emettitori* di onde ultrasoniche di tipo *elettrodinamico* e di tipo *meccanico*.

Emettitori elettro dinamici

Le frequenze ultrasoniche sono facilmente producibili nel campo delle onde elettriche, pertanto il problema diventa quello di trovare un adatto trasduttore cioè uno strumento in grado di convertire energia elettrica in energia meccanica ovvero di trasformare degli impulsi elettrici in impulsi ultrasonici. Se questo trasduttore è reversibile, cioè possiede anche la capacità di operare l'operazione inversa rispondendo ad un impulso ultrasonico con un impulso elettrico, lo strumento può funzionare oltre che da generatore anche da ricevitore di ultrasuoni.

Gli emettitori elettrodinamici sono costituiti in effetti da un sistema di alimentazione elettronica che genera impulsi elettrici e da un sistema trasduttore che trasforma ogni singolo impulso elettrico ricevuto in una breve serie di oscillazioni meccaniche del trasduttore stesso: in pratica questo entra in vibrazione alla sua frequenza naturale e si smorza liberamente.

Il sistema di alimentazione elettronico può produrre singoli impulsi, a comando dell'operatore, o ripetitivi con cadenza ordinatamente fino a 50 s.

La frequenza naturale dei trasduttori è normalmente nel campo da 20 a 200 KHz. Frequenze maggiori di 200 KHz vengono utilizzate raramente dato che diminuisce la distanza utile per la misura a causa dell'attenuazione (nel caso del calcestruzzo cementizio l'attenuazione aumenta all'aumentare della frequenza).

In distanze relativamente lunghe ed in dipendenza di particolari proprietà del materiale, può risultare conveniente l'uso di frequenze minori di 20 Hz.

Tensione ed impedenza di uscita del circuito elettronico devono essere progettate per realizzare sempre un ottimale accoppiamento con i vari trasduttori da utilizzare nei diversi casi. L'uso di lunghi cavi di connessione non deve portare ad apprezzabili perturbamenti al sistema.

Il sistema di alimentazione elettronico genera un segnale elettrico, sincrono all'impulso meccanico della sonda emittente, per pilotare la partenza del misuratore di tempo e sincronizzare la traccia sul tubo a raggi catodici dell'oscilloscopio.

Tale segnale di pilotaggio deve avere un tempo di salita molto breve e costante in modo da dare un istante di partenza stabile e ripetitivo rispetto all'impulso meccanico.

I trasduttori possono essere classificati in base al loro principio fisico di funzionamento. Quelli piezoelettrici utilizzano il suddetto effetto per irradiare vibrazioni elastiche di alta frequenza. Sono costituiti da materiale (generalmente quarzo) che si carica elettricamente quando deformato meccanicamente (effetto piezoelettrico diretto, fig. 7) ovvero si deformavano meccanicamente (Lippman, 1881) quando si applica una tensione elettrica a superfici opposte del materiale (effetto piezoelettrico inverso, fig. 8).

Nel primo caso la grandezza meccanica di ingresso agisce direttamente come stimolo del piezoelettrico, la cui risposta elettrica è raccolta come segnale di uscita.

Nel secondo caso la grandezza elettrica di ingresso agisce direttamente come stimolo del piezoelettrico la cui risposta meccanica costituisce il segnale in uscita.

Con riferimento ai dispositivi che utilizzano l'effetto piezoelettrico diretto si definisce sensibilità (o fattore di conversione) SME il rapporto tra la grandezza elettrica di uscita e quella meccanica di ingresso ed è

$$SME = p K^*$$

dove: K^* è un fattore di trasduzione meccanica, in generale funzione della frequenza, che lega la grandezza di ingresso alla forza esercitata sul piezoelettrico e dipende dalla struttura del dispositivo e dai suoi parametri geometrici-costruttivi. In generale K^* è funzione della costante elastica e di quella dielettrica del piezoelettrico, p è il coefficiente piezoelettrico del materiale corrispondente alla grandezza elettrica di uscita.

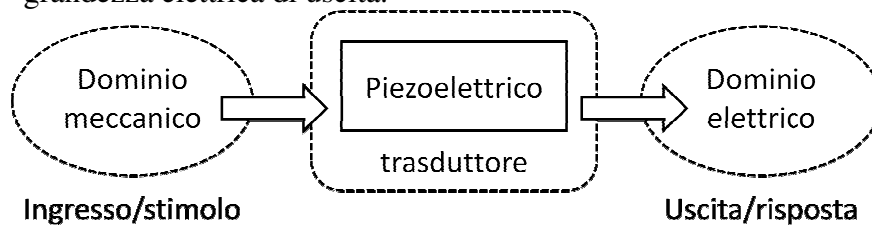


Figura 7: Effetto piezoelettrico diretto (G. Menditto, 2004)

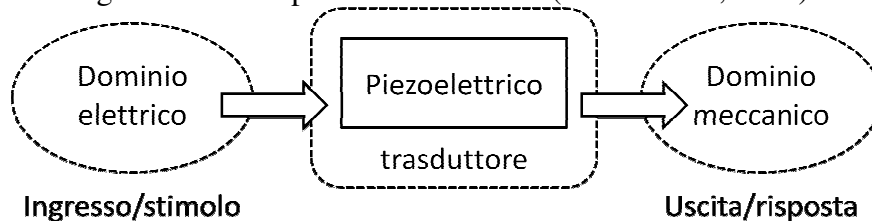


Figura 8: Effetto piezoelettrico inverso (G. Menditto, 2004)

Analogamente per i dispositivi che utilizzano l'effetto piezoelettrico inverso, il fattore di sensibilità viene definito come rapporto tra la grandezza meccanica di uscita e quella elettrica di ingresso ed è

$$S_{EM} = p H$$

dove H è un fattore di trasduzione meccanica, in genere funzione della frequenza, che lega la deformazione del piezoelettrico alla grandezza

di uscita e dipende dalla struttura del dispositivo e dai suoi parametri geometrici costruttivi. In H sono implicitamente incluse la costante elastica e quella dielettrica del piezoelettrico,

p rappresenta il coefficiente piezoelettrico del materiale corrispondente alla grandezza elettrica applicata in ingresso (rispettivamente campo elettrico o intensità di carica).

La piezoelettricità è la proprietà di taluni cristalli (quarzo, formalina, sale di Siequette, titanato di bario, sale di Rochelle, solfato di litio, etc.) di caricarsi elettricamente (cioè di creare una differenza di potenziale fra le loro facce) quando deformati elasticamente da una conveniente azione meccanica. Alla superficie del cristallo si manifestano distribuzioni eteronime di elettricità, la cui somma algebrica è nulla ed in tal senso si parla anche di *materiali intelligenti*.

Ciascun cristallo è caratterizzato da tre assi principali: l'asse elettrico x , l'asse meccanico y e l'asse ottico z (fig. 9).

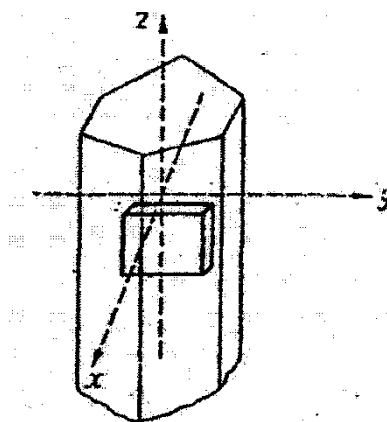


Figura 9: Localizzazione dei principali assi cristallografici in un cristallo di quarzo esadrale (G. Menditto, 2004)

Nel caso di piastre di quarzo queste, secondo la funzione richiesta, possono essere tagliate dai cristalli a vari angoli rispetto ai loro assi principali.

Le tecniche ultrasoniche frequentemente impiegano piastre tagliate perpendicolarmente all'asse elettrico x del cristallo. Quando una tale piastra

è soggetta a compressione o trazione lungo l'asse x , appaiono cariche positive e negative sulle superfici opposte della piastra (fig. 10).

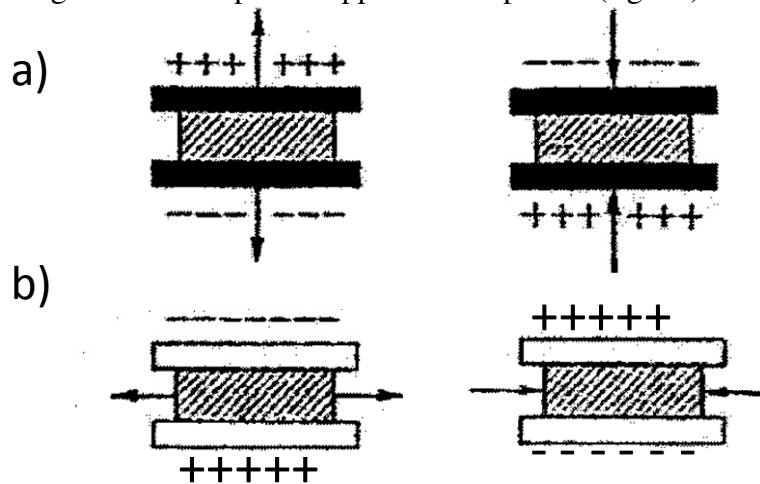


Figura 10: Effetto piezoelettrico (G. Menditto, 2004)
a) tensione e compressione della piastra di "taglio x , sull'asse x .
b) tensione e compressione nella piastra di "taglio x , sull'asse y .

Per trasmettitori e rilevatori di *onde trasversali* o di *onde di taglio* si utilizza una piastra tagliata in modo che la sua superficie sia perpendicolare all'asse meccanico y del cristallo.

Compressione o trazione lungo l'asse z non danno luogo ad alcuna carica. Cristalli di sale di Siequette sono pure largamente utilizzati nell'industria. L'effetto piezoelettrico di questi cristalli è considerevolmente più elevato di quello dei cristalli di quarzo in contrapposizione all'alta resistenza ed alle proprietà soniche di quest'ultimo. Le proprietà piezoelettriche dei sali di cristallo di Siequette differiscono talvolta dalle proprietà piezoelettriche dei cristalli di quarzo. Se una piastra tagliata da un cristallo di sale di Siequette deve essere sollecitata alternativamente a compressione ed a trazione, il taglio deve avvenire perpendicolare all'asse x e deve formare con gli assi y e z un angolo di 45° .

Per aumentare la superficie *dell'emettitore* e del *ricevente* le piastre sono unite in una pila, ogni piastra essendo rivestita con uno strato conduttore o con una foglia sottile.

Le piastre tagliate impiegate per trasmettitori e ricevitori delle onde ultrasoniche sono montate in un speciale nastro metallico (*sonde*). In funzione del tipo di onde e della direzione delle oscillazioni le *sonde* possono essere *diritte*, *inclinate* (prismatiche), etc. Le *sonde diritte* sono impiegate per alimentare onde longitudinali perpendicolari alla superficie sotto prova mentre le *sonde inclinate* sono usate per alimentare oscillazioni ad un angolo per superficie del materiale sotto prova.

Emettitori meccanici

Gli emettitori meccanici generano direttamente l'impulso meccanico tramite un impatto o effetti simili. Sono dispositivi meccanici che creano un impulso di vibrazioni tramite l'impatto veloce di un *battente*. L'impatto può essere singolo o ripetitivo alla cadenza voluta.

Un dispositivo opportuno (*accelerometro*, *trasduttore di forza* od altro) genera all'istante dell'impatto un segnale elettrico di sincronismo per l'apparato di misura del tempo di transito dell'impulso di vibrazione attraverso il sistema in esame e per la traccia *dell'oscilloscopio*. Tale segnale di sincronismo deve avere un tempo di salita molto breve e costante, rispetto all'impulso meccanico, in modo da dare l'istante di partenza alla strumentazione di misura e di visualizzazione in modo stabile e ripetitivo.

L'impulso di vibrazione generato da tale dispositivo non è normalmente caratterizzato da una frequenza propria definita; esso è piuttosto la risultante di più vibrazioni contemporanee, contenute in un determinato intervallo di frequenza e di ampiezza.

Variando le caratteristiche elastiche dell'impatto, la velocità d'urto e la massa battente, può cambiare lo spettro delle vibrazioni componenti l'impulso di vibrazioni generato.

Emettitori elettrostrittivi

Gli emettitori *elettrostrittivi* sono costituiti da materiale ferro-elettrico (placchette da sali inorganici di zirconato di piombo o di titanato di bario, o metaniobato di piombo): Essi sotto l'azione di un campo elettrico, oltre presentare una polarizzazione elettrica, subiscono una deformazione

meccanica nella direzione del campo stesso o, viceversa, a seguito di una sollecitazione meccanica. Si genera una differenza di potenziale agli estremi sollecitati (*effetto elettrostrittivo*).

Tale materiale è normalmente alloggiato in un contenitore metallico di protezione, a cui è necessariamente accoppiato: il tutto è realizzato in modo che ne risulti un oscillatore meccanico di una determinata frequenza naturale.

L'impiego pratico consiste in ogni caso nel fatto che con un oscillatore (generatore di corrente alternata) è possibile provocare in questi materiali una vibrazione della stessa frequenza della corrente usata e poi trasformare la vibrazione del materiale in un'emissione di ultrasuoni sempre della stessa frequenza.

Viceversa se uno di questi materiali viene fatto vibrare da ultrasuoni, si genera una corrente alternata di frequenza uguale a quella dell'ultrasuono incidente. Si hanno così trasduttori reversibili che generano oppure ricevono ultrasuoni.

Per gli usi più usuali vengono richiesti trasduttori con frequenza $50 \div 60$ KHz.

2.3.2 Funzionamento delle sonde

La sonda emittente riceve dal sincronizzatore un impulso di tensione molto breve con valore di picco di ~ 600 V che viene inviato da un lato alla sonda e dall'altro al ricevitore.

L'impulso inviato alla sonda eccita il trasduttore che si deforma istantaneamente ritornando quindi a riposo con delle oscillazioni libere e smorzate. Queste vibrazioni producono un gruppo di onde ultrasonore nel mezzo accoppiato al trasduttore.

L'apparecchiatura consente di regolare la rapidità di smorzamento delle oscillazioni (damping) da cui dipende l'energia di vibrazione della sonda e quindi l'entità del fascio ultrasonico emesso.

Sonda ricevente o ricevitore

Normalmente è di tipo piezoelettrico ma può anche essere di tipo elettrodinamico.

Se si utilizza come emittitore un trasduttore elettrodinamico di una data frequenza, per la massima sensibilità di ricezione si utilizza come sonda ricevente un trasduttore accordato all'emittente e cioè con la stessa frequenza di risonanza.

Ciò vale soprattutto per i casi in cui lunghezza della traiettoria nel mezzo in esame e caratteristiche di assorbimento di questi non alterano sensibilmente le caratteristiche in frequenza dell'impulso meccanico immesso.

Percorsi lunghi e/o materiali con elevate caratteristiche di assorbimento portano ad un'attenuazione delle vibrazioni: tale attenuazione è tanto più intensa quanto più elevata è la frequenza.

In tali casi la frequenza dell'onda di vibrazione in ricezione può risultare notevolmente minore rispetto a quella dell'emissione. Dopo un accurato studio preliminare si ritiene opportuno impiegare per la ricezione sonde di frequenza propria più bassa della sonda emittente, se questa è del tipo elettrodinamico.

La scelta della frequenza più idonea per la sonda ricevente deve essere sempre effettuata se l'emittitore è di tipo meccanico.

Il segnale emesso dalla sonda ricevente entra in un opportuno amplificatore, il cui guadagno, regolabile con la risoluzione di 1 dB, può essere variato a volontà, per quantità nota; eventualmente filtrato e trattato per ridurre la componente di rumore ed esaltarne le componenti ripetitive; visualizzato sullo schermo di un oscilloscopio e sottoposto al rilievo degli intervalli di tempo.

Scopo dell'amplificazione variabile, il cui guadagno massimo deve essere il più elevato possibile in funzione del rapporto segnale-rumore, è di effettuare sia la regolazione di tempo "zero", sia i vari rilievi sull'elemento in esame, con segnale alla misura di ampiezza sensibilmente costante.

Ciò permette inoltre (allorché si ottengono, adottando gli opportuni accorgimenti, segnali in ricezione ripetitivi e costanti in ampiezza e forma al variare della pressione delle sonde sulla struttura) di valutare, al variare dei punti di misura, sia il tempo di propagazione, sia le relative variazioni

dell'amplificazione necessarie per avere un segnale di ampiezza costante sullo schermo dell'oscilloscopio.

Per ridurre il livello di rumore del segnale ricevuto è desiderabile che il dispositivo di amplificazione e trattamento del segnale sia fornito di un dispositivo elettronico di "media", cioè di un dispositivo che sommi e dia il valore medio di una molteplicità prefissata di segnali, in modo da evidenziarne le caratteristiche ripetitive e ridurre le caratteristiche casuali.

Tutto l'apparato di amplificazione in ricezione deve avere una frequenza di taglio maggiore di almeno cinque volte la frequenza naturale più elevata delle sonde che si intendono utilizzare.

E' ammessa una certa attenuazione alle basse frequenze come mezzo per aumentare il rapporto segnale-rumore, ma la curva di risposta deve rimanere piatta fino a frequenze di circa $1/5$ della frequenza naturale minima dei trasduttori che si intende utilizzare. Mentre è ammesso, elevando il guadagno della catena di amplificazione, elevare i valori di picco del segnale in ricezione, non è ammesso aumentare il rapporto segnale-rumore o rendere il segnale stesso più nitido e definito, utilizzando tecniche di condizionamento del segnale note come grass-cutting.

Per quanto riguarda le condizioni operative ambientali, l'apparato deve poter operare con le prescritte caratteristiche entro l'intervallo di temperatura compreso tra -10°C e $+45^{\circ}\text{C}$ con umidità relativa fino al 90% e con variazioni di tensione di alimentazione del 10%.

2.3.3 Influenza delle proprietà chimiche, fisiche e strutturali dei materiali, della forma e delle condizioni superficiali del componente sulla propagazione degli ultrasuoni

Nel caso del conglomerato cementizio armato i fattori che incidono sulla propagazione delle onde ultrasoniche sono essenzialmente quelli dovuti (G. Menditto, 2004):

A. agli aggregati

Influiscono il tipo, la porosità ed il volume degli aggregati per unità di volume. Prove sperimentali hanno mostrato che un incremento del volume degli aggregati incrementa la velocità ultrasonora.

La velocità ultrasonora dipende pure dal rapporto cemento-aggregato e dal tipo di cemento.

B. all'entità del carico

Prove di misure di velocità ultrasonora su provini cubici sottoposti ad un carico inferiore a quello di rottura, hanno evidenziato una correlazione significativa tra velocità (espressa in percentuale rispetto alla velocità misurata sul provino scarico) e carico (espresso in percentuale rispetto al carico di rottura). Per valori di compressione superiori al 50% del carico di rottura, la velocità si riduce fino a raggiungere il 50% di quella corrispondente alla rottura.

C. all'età del calcestruzzo

La velocità degli ultrasuoni aumenta con la maturazione. Ad uno stesso valore di velocità, la resistenza del calcestruzzo maturato in acqua, risulta inferiore a quella relativa alla maturazione in aria.

D. alla condizione della superficie del calcestruzzo: liscia, rugosa, etc.

E. alla forma e dimensione della struttura

La velocità degli ultrasuoni è indipendente dalla forma e dalle dimensioni dell'elemento sottoposto a prova, purché la dimensione minima laterale (d) in direzione ortogonale a quella di propagazione non sia inferiore ad un valore minimo e la lunghezza attraversata (L) sia sufficientemente grande da non risentire in modo significativo della natura eterogenea del calcestruzzo. La raccomandazione RILEM impone per d il valore minimo di 80 mm per una frequenza di trasmissione di 50 KHz. La BS 4408 parte 5 prescrive per L i valori minimi di 100 mm e 150 mm rispettivamente per calcestruzzi di inerti con diametro massimo di 30 mm. e 45 mm. ed una precisione della sua misura di $\pm 1 \%$. Al di sotto dei valori indicati la velocità si riduce.

Pertanto il metodo ad ultrasuoni è utilizzabile indipendentemente dalla forma e dimensione del campione, ma in rapporto alla potenza meccanica disponibile ed alla sensibilità dell'apparato ricevente.

F. alla lunghezza del percorso

Esiste una dipendenza nei casi di percorsi molto brevi, dovuta alla natura eterogenea del calcestruzzo. Variando il percorso da 150 mm a 500 mm la variazione di velocità è pari al 4% ed al 2,5% per calcestruzzo rispettivamente secco e saturo.

L'intervallo di lunghezze di percorso è limitato:

a) *inferiormente* dall'influenza che le condizioni di rugosità superficiale, le caratteristiche fisiche del materiale (per esempio porosità), e soprattutto la composizione (distribuzione granulometrica degli aggregati) possono avere sulle misure.

Di conseguenza vengono raccomandate le seguenti distanze minime di misura:

- 100 mm per calcestruzzo in cui la dimensione massima dell'aggregato è < di 30 mm;
- 150 mm per calcestruzzo in cui la dimensione massima dell'aggregato è < 45 mm;

b) *superiormente*, dalla variazione subita dal segnale in ampiezza ed in frequenza.

Percorsi più lunghi possono essere indagati facendo uso di trasduttori con frequenze naturali di vibrazioni basse (10 a 20 KHz, e talvolta anche minori), per minimizzare l'assorbimento del segnale nel calcestruzzo.

L'uso di sonde con frequenze più elevate (~ 50 KHz) permette, su percorsi brevi, di ottenere misure di tempo più accurate. La velocità degli impulsi può essere sensibilmente influenzata dalle dimensioni trasversali dell'elemento in esame, rispetto alla direzione di propagazione.

G. alla presenza di armature

In prossimità di barre di armatura la velocità risulta maggiore in quanto l'impulso rilevato dalla sonda ricevente avrà viaggiato in parte nelle barre (la

velocità degli ultrasuoni nell'acciaio è maggiore, da 1,4 a 1,7 rispetto a quella del calcestruzzo).

Per quanto possibile è pertanto opportuno evitare che il tratto interessato dalla misura sia attraversato dalle barre di armatura. In caso contrario occorre applicare un opportuno fattore di riduzione

Nel caso in cui i ferri siano di diametro inferiore ai 10 ÷ 12 mm. l'effetto della loro presenza può essere trascurato.

La determinazione della velocità dell'impulso, misurata nel conglomerato cementizio armato in vicinanza delle barre, porta dunque a valori più elevati di quelli ottenibili nel conglomerato cementizio non armato, poiché le onde che si propagano nell'acciaio giungono al trasduttore ricevente in un tempo minore.

La diminuzione del tempo di propagazione dipende:

- dalla vicinanza delle barre di armatura rispetto all'asse congiungente i centri dei trasduttori;
- dalle dimensioni e dal numero delle barre di armatura;
- dal loro orientamento rispetto all'asse congiungente i centri dei trasduttori.

2.4 La Termografia

2.4.1 Generalità

La norma di progetto UNI definisce la termografia come la tecnica che permette di ottenere la distribuzione della radiazione infrarossa proveniente dalla scena osservata nell'intervallo di sensibilità di una apparecchiatura di analisi e misurazione.

La termografia è quindi la tecnica che permette di ottenere, per mezzo di un sistema all'infrarosso, la distribuzione della radiazione infrarossa proveniente dalla scena osservata, nell'intervallo di sensibilità dell'apparecchiatura (ENEA).

La termografia esiste da oltre 40 anni nel campo delle prove non distruttive e come tale permette di controllare, analizzare e studiare un soggetto senza modificarne la struttura e/o il funzionamento.

Essa si basa sull'esame di immagini, costruite con tecnologia elettronica, che presentano tonalità di grigio o colore proporzionali alle radiazioni elettromagnetiche, nella lunghezza d'onda dell'infrarosso, emesse da un corpo in funzione della sua temperatura assoluta.

Il risultato è la possibilità di visualizzare e misurare su schermo la mappa termica a falsi colori di qualsiasi oggetto; dalla quale è spesso possibile, attraverso la visualizzazione delle differenze di temperatura, individuare in un impianto, processo o componente, anomalie indicanti rotture incipienti o malfunzionamenti che necessitano azioni correttive.

La metodologia termografica, pur avendo un elevato potere ispettivo, a tutt'oggi non ha trovato un'adeguata diffusione, per vari motivi, tra cui non è da trascurare l'elevato costo attuale delle apparecchiature.

Si ritiene che, sulla mancata diffusione, ancor più incida una scarsa conoscenza sulle potenzialità del metodo ed una esigua opportunità di acquisire la preparazione necessaria ad utilizzarlo al meglio.

Inoltre un contributo negativo è dato dalla mancanza di una normativa per l'uso di tecniche termografiche.

Occorre tener presente che, per poter operare correttamente nel campo dei controlli non distruttivi, è necessario avere una notevole conoscenza, oltre che dei mezzi di rilevamento, soprattutto dei fenomeni fisici utilizzati dal metodo e di quelli che agiscono sull'oggetto che si esamina.

Un dispositivo per la produzione di immagini termiche deve essere costituito da tre componenti di base:

- un obiettivo che ha la funzione di focalizzare il campo osservato;
- un sensore all'infrarosso;
- un visualizzatore-processore che scansiona il bersaglio mediante uno specchio rotante con più facce (o uno di tipo oscillante) allo scopo di scannerizzare l'intera ampiezza dell'oggetto in esame.

In altri termini il sistema effettua una scansione in X-Y dell'area analizzata ottenendo l'immagine termica delle superfici; tuttavia esistono sistemi più

evoluti che hanno sostituito il processo a scansione con un sistema di matrici a detettori.

In quest'ultimo caso il detettore a raggi infrarossi misura la energia irradiata dalla superficie del corpo in esame per mezzo di sensori che convertono i segnali analogici in livelli di radianza digitale.

Si ritiene opportuno evidenziare le differenze e le analogie tra radiazione visibile e infrarossa, dato che anche dal punto di vista normativo esiste l'analogia tra esami visivi e termografici, la quale ha supplito finora alla carenza normativa già menzionata.

Nella categoria degli esami visivi, come già accennato nella premessa, possono essere raggruppati tutti quei controlli che utilizzano le radiazioni elettromagnetiche nel campo visibile.

Gli esami termografici possono essere considerati come estensione degli esami visivi dal punto di vista del principio fisico sul quale sono basati.

A causa dei valori assai prossimi delle rispettive lunghezze d'onda, molte caratteristiche della radiazione infrarossa si presentano simili a quelle della radiazione visibile: essa può essere totalmente riflessa da alcuni specchi o trasmessa attraverso elementi ottici come il germanio ed il silicio.

Essa non penetra attraverso una normale superficie opaca, ma viene trasmessa con piccole attenuazioni attraverso sottili pellicole di plastica trasparenti (polietilene, PVC, ecc.)

La radiazione infrarossa viaggia in linea retta e molti emettitori e assorbitori dell'infrarosso presentano un comportamento variabile in funzione della lunghezza d'onda.

Molti materiali ottici, opachi nel visibile, sono trasparenti nell'infrarosso (germanio, silicio, IRTRAN), viceversa molti oggetti trasparenti nel visibile sono opachi nell'infrarosso medio ed estremo (la maggior parte dei vetri ottici).

I difetti ottici influenzano le prestazioni delle apparecchiature infrarosso in modo molto differente: un graffio su una lente o uno specchio nello spettro visibile può rendere lo strumento ottico totalmente inservibile al suo scopo, mentre nello spettro infrarosso, a causa delle larghe aperture e delle elevate velocità di scansione, rigature e piccole porosità possono essere invisibili all'apparecchiatura.

Normalmente ci si serve dell'infrarosso per osservare sorgenti di calore e non sorgenti luminose. L'esempio maggiormente esplicativo è quello di una lampada ad incandescenza accesa in una stanza buia: essa è visibile sia all'occhio umano sia all'infrarosso; spegnendola, essa non è più visibile all'occhio umano, ma rimane visibile nell'infrarosso per lungo tempo, perché si trova a temperatura superiore a quella dell'ambiente.

La lampada rimarrà visibile nell'infrarosso finché non si sarà raffreddata alla medesima temperatura dell'ambiente.

Una particolarità del comportamento delle radiazioni infrarosse è che, per la loro altissima frequenza (rispetto alle onde radio ad esse adiacenti), esse modificano le strutture molecolari e di conseguenza vengono assorbite da quasi tutti i corpi.

Questo assorbimento porta evidentemente, come conseguenza, una produzione di energia.

Si possono così considerare le onde infrarosse sotto due aspetti successivi: la modificazione che apportano alla struttura molecolare (azione chimica delle onde infrarosse) e lo sviluppo di energia termica da esse provocato.

Le radiazioni infrarosse sono dette anche, impropriamente, radiazioni calorifiche oscure (a causa della loro proprietà di scaldare i corpi dai quali vengono assorbite).

Quest'ultima denominazione è impropria, perché in realtà tutte le radiazioni, essendo essenzialmente energia che si propaga, hanno la proprietà di trasformarsi in calore allorché vengono assorbite senza produrre altri effetti.

Sta di fatto che a questa categoria appartengono le radiazioni che i corpi usualmente emettono in quantità maggiore; è con esse che lo sviluppo di calore si manifesta in modo più sensibile.

3.4.2 II telerilevamento e la termografia

Il telerilevamento (Remote Sensing) è un settore di quel più ampio campo di studio che si occupa della raccolta, trasmissione, gestione e memorizzazione dei dati, di varia origine, che riguardano l'ambiente.

Come dice il nome stesso, l'acquisizione dei dati avviene a distanza dall'oggetto investigato: in particolare le informazioni sull'oggetto studiato viaggiano su un ponte elettromagnetico costituito dalla luce visibile e da altre radiazioni dello spettro.

L'astronomia può essere considerata come la forma più antica di telerilevamento, dato che non esiste alcun contatto fisico fra gli strumenti impiegati in astronomia e l'oggetto stesso dell'analisi.

E' opportuno sottolineare che nel telerilevamento, come è inteso oggi, sono implicite operazioni di misura: solamente con l'avvento di strumenti quantitativi (non solo descrittivi), per la definizione delle grandezze geometriche e fisiche, si è verificato il passaggio dalla osservazione alla misura, rendendo ripetibili e quindi confrontabili i dati raccolti.

Il primo passo è avvenuto quando, in astronomia, si è sostituito all'occhio paziente dell'osservatore, la lastra fotografica. Su di essa l'informazione viene memorizzata come densità o tonalità di grigio, rendendo possibile con l'ausilio di altri strumenti (densitometri, ecc.) la misura di alcune grandezze ed il confronto dei dati nel tempo.

La fotografia, mediante l'impiego di lastre in bianco e nero, permette la valutazione dell'aspetto geometrico degli oggetti.

Con la fotografia a colori si allarga il campo delle conoscenze sull'oggetto del nostro studio aggiungendo alla geometria altre informazioni sul colore.

Spingendoci oltre il campo della luce visibile, nuovi tipi di informazione concorrono a meglio definire un oggetto, cioè a classificarlo oltre che attraverso il suo aspetto geometrico, anche per le caratteristiche strutturali.

Il campo dello spettro elettromagnetico è molto ampio e molto diverse sono le proprietà che esso mostra nelle varie regioni "codice colori", che rende l'immagine di facile interpretazione, introducendo una gamma di grigi di tonalità diverse, oppure una tavolozza di colori a cui corrispondono singole temperature di riferimento.

In questo modo l'immagine resa dal monitor viene visualizzata per campi di temperatura, o meglio, per gradienti di temperatura a colori diversi, che possono variare da pochi gradi a molti a seconda delle necessità.

Le immagini acquisite possono subire trattamenti successivi, per essere adattate alle diverse esigenze di indagine, se il sistema permette di attuare

alcune funzioni, come per esempio la possibilità di selezionare alcune zone del campo, per assegnare a corpi costituiti da materiali diversi valori di emissività corrispondenti, al fine di ottenere una indicazione più reale della temperatura.

Alcuni sistemi termografici sono anche dotati di memoria interna, nella quale è possibile salvare in file un certo numero di termogrammi, che possono essere utilizzati per completare o integrare il campo di analisi.

Oggi, un sistema evoluto consente un trattamento di dati particolarmente veloce e l'immagazzinamento di oltre diecimila immagini, grazie a memorie di massa (hard disk) di oltre 20 Gbit.

Normalmente i sistemi termografici sono dotati di pacchetti software che ne supportano la messa a punto per il funzionamento, impostando i parametri più corretti, e gestiscono l'analisi delle immagini fino a fornire l'input per la stampa delle stesse.

Questi programmi operano in ambiente Windows e sono in prevalenza di tipo aperto per consentire l'integrazione con software utilizzati dall'utente.

Il vantaggio principale dei dispositivi di rilevazione termografica è quello di consentire la visualizzazione nello stesso tempo di tutto il campo in esame e di poter monitorare la mappa dei gradienti di temperatura, anche se l'oggetto, o più di un oggetto, risultano in lento movimento.

Ovviamente con l'avanzare delle sperimentazioni pratiche e con l'introduzione delle nuove tecnologie, i sistemi di produzione delle immagini sono stati sempre più dedicati agli specifici settori di impiego, prendendo forme diverse in base alle diverse applicazioni, distinguendo quelli destinati ai sistemi di manutenzione da quelli relativi al controllo qualitativo, alla regolazione dei processi industriali su oggetti a flusso continuo o discontinuo, statici o in movimento, fino a quelli afferenti la ricerca avanzata.

3.4.3 Caratteristiche principali delle apparecchiature termografiche.

Tutti i sistemi per il rilevamento di immagini termiche raccolgono e focalizzano, per mezzo di opportuni sistemi ottici, radiazioni infrarosse, provenienti da un definito campo visivo, su di uno o più elementi sensibili che trasformano la radiazione in un segnale elettrico, per poi convertirlo con opportuni dispositivi ed elaborazioni, in forma percepibile dall'occhio umano.

Nel rilevamento di immagini si cerca di perseguire l'obiettivo di ottenere:

- elevata risoluzione geometrica, per la percezione del dettaglio;
- elevata risoluzione termica, per distinguere piccole variazioni di energia;
- elevato numero di immagini al secondo, per poter rilevare fenomeni che si evolvono rapidamente o corpi che si muovono rapidamente;
- ottimizzazione della visione, eliminando sfocature ed aloni;
- semplicità di utilizzo e di registrazione delle immagini.

3.4.4 Interpretazione delle immagini

L'immagine termica dell'oggetto, come si è già accennato, può essere rappresentata

- mediante una scala di grigi, per la quale le zone più calde che emettono le radiazioni più intense appaiono più chiare delle altre;
- tramite l'uso di tavolozze di falsi colori, che adottano colori caldi, dal rosso all'arancio, al bianco per le alte temperature e colori freddi per le basse temperature, andando dal verde all'azzurro e al nero.

Quindi a valle di un sistema termografico ritroviamo immagini, costruite con tecnologia elettronica, che presentano tonalità di grigio o falsi colori, proporzionali alle radiazioni elettromagnetiche, nella lunghezza d'onda dell'infrarosso, emesse da un corpo in funzione della sua temperatura assoluta.

Si tratta di falsi colori perché il colore è in realtà funzione della lunghezza d'onda di una radiazione elettromagnetica appartenente alla banda visibile.

Un'immagine a falsi colori, però, permette di avere immediatamente un'idea qualitativa di quella che è la mappatura termica dell'oggetto ripreso, (l'associazione colore-temperatura è una di quelle che viene fatta propria

molto presto nell'uomo, proprio perché se ne trova riscontro immediato nei fenomeni naturali cui si assiste quotidianamente) adeguando di volta in volta la scala dei colori al range di temperatura in cui ricade la scena ripresa. L'interpretazione delle immagini è la parte più difficile nella applicazione delle tecniche termografiche

Forti indicazioni con grandi differenze di temperatura sono facilmente interpretabili.

Forti indicazioni generalmente forniscono immagini attendibili di anomalie quanto le deboli indicazioni.

Una anomalia vicina alla superficie da luogo ad una indicazione più forte dell'indicazione fornita da un'anomalia identica posta a distanza maggiore dalla superficie e l'indicazione risultante darà una idea più chiara della dimensione e della forma della discontinuità.

Le immagini termiche, come sappiamo, riflettono il flusso del calore nelle strutture.

Se le strutture hanno nell'interno zone di inclusioni anomale o cavità, il calore fluirà più velocemente o più lentamente, rispettivamente, attraverso queste zone.

Il contorno di una struttura avrà un maggiore trasferimento di calore per irraggiamento e convezione rispetto al resto della struttura.

Anche i supporti di una struttura influiranno sulle immagini rilevate, poiché sono, generalmente, un'altra causa di trasferimento di calore.

Le immagini termiche possono anche essere, influenzate da altri fattori: le variazioni di emissività dovute a differenze di colorazione o di asperità sulla superficie dell'oggetto in esame, possono dare indicazioni termiche non realistiche.

Per cui la prima cosa da fare è verificare l'uniformità e lo stato delle superfici in esame.

Una volta fatto questo, se non esiste una correlazione fra lo stato superficiale e l'immagine termica, può sospettarsi un'anomalia interna.

Disponendo del sistema di digitalizzazione delle immagini, occorre elaborare queste immagini sospette per verificare l'indicazione con operazioni di filtraggio, media di più immagini, somma e sottrazione di due immagini, in modo da eliminare le informazioni non desiderate.

Se l'indicazione persiste, essa è probabilmente un'anomalia.

La ottimizzazione delle immagini digitalizzate può essere utilizzata per migliorarne la qualità.

I filtri spaziali possono essere utilizzati per eliminare i disturbi ad alta frequenza generati dai dispositivi di riscaldamento e dalle sorgenti esterne.

Una delle tecniche è quella di sostituire matematicamente ad ogni elemento di superficie il valore mediato con 3 o 4 elementi vicini.

Se le immagini non variano rapidamente può essere anche fatto il valore medio su più immagini, per ridurre i disturbi.

La media di 100 immagini consecutive, elemento di superficie per elemento di superficie, può ridurre i disturbi del 90 %.

Per esaltare il rilevamento di difetti possono anche essere utilizzate funzioni di sottrazione nel dominio dello spazio e nel dominio del tempo.

Le funzioni di sottrazione nel dominio del tempo possono eliminare:

- temperature differenziali dovute a sorgenti ripetitive di disturbi (come variazioni locali di emissività delle superfici);
- le forme dovute alle disuniformità delle sorgenti di calore (puntiformi o lineari),
- eventuali variazioni nei carico termico non correlato con anomalie.

Se non è possibile riferire l'oggetto a se stesso, allora si deve poter disporre di un oggetto di caratteristiche simili privo di difetti per costruire una immagine di riferimento nel dominio dello spazio.

Per esempio si può sottrarre un'immagine ripresa da un oggetto nuovo, privo di difetti, o di un processo che funzioni secondo le condizioni regolari e sottrarla all'immagine dell'oggetto invecchiato e rovinato o del processo in uno stato successivo per rilevare anomalie insorte a lungo termine, la propagazione dei difetti o le variazioni nel processo.

Quando i disturbi non sono prevedibili (come quando è imprevedibile l'emissività della superficie o quando sono presenti riflessioni da sorgenti non note), la funzione di sottrazione nel dominio del tempo aiuta ad esaltare il rilevamento delle anomalie.

In generale, i metodi termografici non forniscono di per se stessi direttamente dati quantitativi sulle anomalie.

Una eccezione sono i film sottili, nei quali le dimensioni delle anomalie e la loro forma possono essere rapidamente rilevate con una buona approssimazione attraverso immagini termiche opportunamente ottimizzate. La qualificazione ed il dimensionamento di anomalie rilevate con le tecniche termografiche richiedono normalmente l'intervento di altri metodi non distruttivi, cioè di un secondo metodo.

Per esempio il dimensionamento e la forma di delaminazioni in un laminato di grafite/epoxy, rilevate termograficamente, possono essere dimensionate con ultrasuoni.

Una fessurazione in un manufatto può essere dimensionata con metodi radiografici o correnti indotte o tomografia.

Vi sono molti casi in cui un primo dimensionamento termografico può essere utile.

Ad esempio in un processo che produce oggetti caldi (fucinatura), una indicazione immediata può essere di notevole utilità poiché il raffreddamento per una ulteriore ispezione con altre metodologie richiede tempi molto lunghi.

Un altro esempio sono i riporti di strati sottili che richiedono una rapida valutazione degli spessori per assicurare uno strato adeguato.

Nelle analisi termografiche occorre infatti utilizzare standard di riferimento, come del resto nelle altre metodologie CND.

Gli standard servono a garantire la validità dei metodi di eccitazione e dei sensori di temperatura utilizzati.

I campioni standard di riferimento sono essenziali per poter eseguire delle valutazioni quantitative.

Un campione di riferimento standard deve possedere caratteristiche superficiali e termiche simili ai componenti o agli oggetti in esame.

Per esempio, se il soggetto è un giunto saldato, il campione di riferimento deve essere costituito da un giunto, saldato con superficie di contatto delle stesse dimensioni, stessa zona termicamente alterata, stesso diametro ed altre caratteristiche simili.

Il campione standard deve essere privo di anomalie ed un secondo campione standard deve contenere uno stato di anomalie inaccettabili.

Gli standard per il dimensionamento delle anomalie debbono contenere delle anomalie in progressione crescente come dimensioni.

Gli standard debbono poter ricoprire tutte le potenziali condizioni di scarta/accetta che possono essere reperite nei componenti da ispezionare.

Questo richiede lo svolgimento di un programma di attività per stabilire le dimensioni e la forma delle anomalie inaccettabili per i componenti da sottoporre ad ispezione.

Numerose misure in dinamica sono necessarie per stabilire le correlazioni fra la risposta all'eccitazione termica e l'ubicazione e dimensioni delle anomalie.

Utilizzando eccitazioni pulsate o modulate, il tempo di ritardo nella risposta termica può essere registrato come una variazione di fase, che può essere correlata a parametri come ad esempi spessori di riporti o a profondità di delaminazioni.

In alternativa, le variazioni di posizione di isoterme nel tempo possono essere considerate come una funzione delle dimensioni e della profondità delle anomalie per stabilire le caratteristiche della risposta dinamica.

La ricostruzione dell'immagine è possibile grazie alla limitata acuità visiva dell'occhio umano (abilità di vedere distinti due oggetti molto vicini), cioè al fatto che esso non percepisce entro certi limiti la struttura granulare dell'immagine riprodotta.

Una immagine ripresa da una telecamera o termocamera può, quindi, considerarsi come suddivisa in tante aree elementari, e la definizione e risoluzione del sistema di ripresa (capacità di vedere distinti e separati due punti vicini) dipende da quanto esso sia in grado di suddividere finemente tutta la superficie dell'immagine in areole elementari e da quanto sia in grado di trasmetterle risolte nei singoli segnali relativi.

La precisione che si può ottenere è, in generale, inversamente proporzionale alle dimensioni della scena inquadrata e dipende notevolmente dai componenti utilizzati per la realizzazione del sistema di misura e valutazione.

Non è da sottovalutare, inoltre, il peso che deriva dalla elaborazione delle immagini e dai programmi utilizzati per l'estrazione delle informazioni geometriche ed energetiche.

Con opportuni accorgimenti è possibile raggiungere precisioni elevate.

Il grado di precisione ottenibile con i sistemi di telerilevamento, il più delle volte, si adegua automaticamente al componente da rilevare, considerato il fatto che la precisione è strettamente legata alle dimensioni della scena inquadrata.

Da una operazione di teletermorilevamento può essere eseguita una analisi termica ed una analisi dimensionale della scena ripresa.

Inoltre è possibile realizzare sistemi di monitoraggio automatici.

La ricerca attuale verte proprio verso questo ramo.

3.5 La Tecnica Radiografica

Nell'ambito dei controlli non distruttivi la tecnica radiografica (RT-Radiographic Testing) è una delle più usate in quanto consente di evidenziare un gran numero di discontinuità presenti in manufatti industriali, getti o saldature, quali ad esempio: porosità, inclusioni, soffiature, cricche, tarli, inclusioni di scoria, mancanza di penetrazione.

Il metodo è esattamente equivalente a quello della radiografia usata in medicina: quando un fascio di onde elettromagnetiche fortemente penetranti, cioè ad elevatissima energia fotonica (elevata frequenza) e fortemente ionizzanti (raggi X), passa attraverso l'oggetto da esaminare, viene assorbito, ovvero attenuato con legge esponenziale, in funzione dello spessore e della densità della materia attraversata.

I fenomeni che si possono verificare all'interno della materia investita dal fascio di raggi X sono:

- l'effetto fotoelettrico o assorbimento fotoelettrico; il fascio di radiazione entrante va ad urtare contro un elettrone orbitale e lo espelle dall'orbita mentre il fotone viene assorbito nella materia; tale effetto è presente alle basse tensioni al di sotto dei 150 KeV;
- l'effetto Compton o dispersione Compton che interessa gli elettroni liberi o quelli delle orbite più esterne debolmente legati al nucleo dell'atomo; il fotone incidente, che deve avere un'energia superiore all'energia del legame elettrone-nucleo della materia, espelle l'elettrone cedendogli parte della propria energia; il fotone entrante

viene così sostituito con un altro di energia minore che procederà in una direzione diversa da quella originale; tale deviazione sarà maggiormente sensibile all'aumentare dell'energia ceduta; tale fenomeno si verifica al di sopra dei 150 KeV;

- la produzione di coppie; il fotone entrante sparisce creando una coppia di ioni (e^- , e^+) elettrone e positrone avente energia pari a 0,51 Mev.

I raggi X passanti e variamente attenuati impressionano, in base ai suddetti fenomeni, una lastra fotografica posta dietro l'oggetto da esaminare (illuminando uno schermo rivelatore, nel caso delle radioscopie); due sono i tipi di radiazione che fuoriuscendo dal corpo in esame vanno ad impressionare la lastra:

- radiazione secondarie; gli elettroni che per l'effetto fotoelettrico, Compton o per la produzione di coppie, vengono espulsi o spostati dalla propria orbita, provocano uno squilibrio nell'atomo con conseguente spostamento di altri elettroni orbitali e susseguente emissione di radiazione.

Gli stessi elettroni espulsi che avranno acquistato una certa accelerazione, potranno a loro volta spostare altri elettroni provocando effetti simili, oppure sotto l'azione del campo elettrostatico del nucleo essere frenati con conseguente emissione di radiazione a spettro continuo; tutte queste radiazioni si chiamano secondarie ed avranno un'energia nettamente inferiore all'energia della radiazione incidente ed una direzione di propagazione diversa;

- radiazioni diffuse; sono quelle radiazioni uscendo fuori dal corpo in esame mantengono gran parte della propria energia e con una piccola differenza tra la direzione dell'angolo incidente e diffuso proporzionale all'energia residua.

Lo sviluppo fotografico della lastra porterà degli annerimenti nelle varie zone, più o meno intensamente in funzione della dose di radiazione ricevuta; si definisce densità fotografica (D) il logaritmo in base 10 del rapporto tra la luce incidente e la luce trasmessa dalla pellicola:

$$D = \log_{10} \frac{\text{intensità luce incidente}}{\text{intensità luce trasmessa}}$$

L'eventuale presenza nell'oggetto esaminato di difetti quali cavità, fessure, grosse inclusioni meno assorbenti della matrice o discontinuità di materiale più denso e quindi più assorbente, sarà evidenziata sulla lastra dalla presenza di macchie più scure o più chiare, d'intensità proporzionale allo spessore del difetto, il quale apparirà delimitato dalla sua proiezione prospettica.

Nel caso delle radioscopie in continuo lo schermo s'illuminerà più o meno intensamente secondo la dose di radiazione ricevuta, dunque darà la stessa immagine, ma in positivo rispetto alla radiografia.

I raggi X sono generati artificialmente in particolari tubi catodici che emettono soltanto, quando s'applica tensione agli elettrodi, la radiazione di frequenza desiderata in funzione della composizione del catodo e d'intensità regolabile entro certi limiti; in questo caso si parlerà, dunque, di lampada a raggi X in quanto l'emissione cessa, proprio come la luce d'una lampadina elettrica, quando s'apre il circuito.

Le radiazioni X sono altamente ionizzanti, vale a dire possono distruggere i legami molecolari della materia organica ed esser molto dannose.

Quando si lavora con intensità superiore ad un valore minimo di soglia, per legge è obbligatorio operare in adatti locali d'irraggiamento (bunker), opportunamente protetti con schermature di piombo o con pareti di cemento armato anche di alcuni metri di spessore, e dotati di opportuni allarmi che impediscano agli operatori di dare il via all'emissione di raggi X.

La radiografia industriale è proficua per l'esame di pezzi di geometria semplice, la cui proiezione dia luogo a sfondi relativamente omogenei, nei quali ogni piccola variazione d'intensità d'annerimento (o di luminosità) è facilmente osservabile ed interpretabile; tale tecnica richiede una grande esperienza quanto più complessa è la geometria dei pezzi.

Il pregio principale della radiografia è quello di fornire immagini di più facile interpretazione che non gli echi degli ultrasuoni, ma non può dare indicazioni sulla profondità del difetto rivelato, se non con due proiezioni ortogonali fra loro.

La tecnica RT, purtroppo, evidenzia soltanto difetti di forma tendenzialmente tridimensionale, oppure bidimensionale ma orientati tangenzialmente al fascio di raggi incidenti; ad esempio una soffiatura sarà bene evidenziata in ogni proiezione, mentre una cricca si vedrà bene solo quando sarà quasi parallela al fascio di raggi che attraversa il pezzo.

Il metodo non consente d'eseguire facilmente rapide sequenze di altre proiezioni del pezzo da esaminare, se non attraverso la radioscopia, che necessariamente deve operare con potenze limitate per ragioni di sicurezza dell'operatore o con attrezzature estremamente costose.

Le limitazioni del metodo sono legate allo spessore massimo ed alla complessità geometrica dei pezzi da esaminare, alla forma e giacitura dei difetti e soprattutto all'elevato costo delle attrezzature e della loro manutenzione.

3.5.1 Principio di funzionamento del tubo a raggi X

I raggi X sono prodotti da un'attrezzatura costituita:

- una sorgente di elettroni;
- una differenza di potenziale (che serve a dare potenza al fascio di elettroni);
- un bersaglio dove gli elettroni sbattono generando raggi X.

Il tubo a raggi X classico (Figura 11) consta di un'ampolla di vetro nella quale sono disposti sotto vuoto un elettrodo positivo (anodo), e un elettrodo negativo (catodo).

Il catodo è costituito da un filamento che, portato all'incandescenza da una corrente di alcuni Ampère, per effetto termoionico emette elettroni; sotto l'effetto della differenza di potenziale esistente tra l'anodo e il catodo (la tensione del tubo), gli elettroni catodici sono attratti verso l'anodo; questa corrente di elettroni viene concentrata in un fascio mediante un "cilindro" o "cupola di concentrazione".

L'anodo comprende una placchetta, detta anticatodo, avente un alto punto di fusione collocata all'interno dell'anodo stesso.

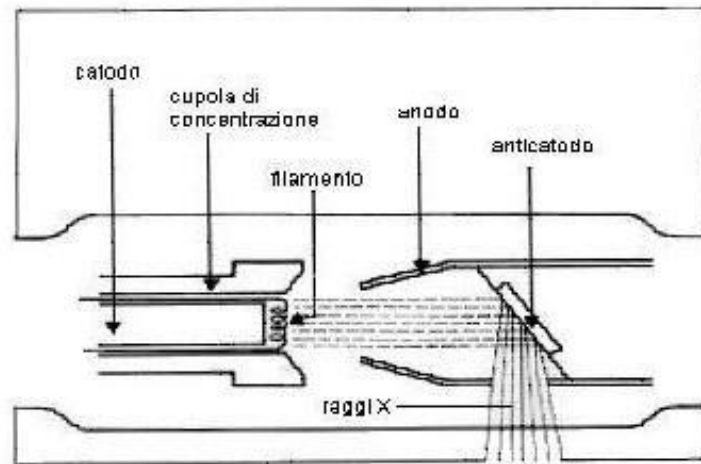


Figura 11: Tubo catodico a Raggi X

I raggi X vengono generati quando gli elettroni accelerati emessi dal filamento caldo urtano l'anticatodo; nell'interazione tra gli elettroni e l'anticatodo si possono verificare i seguenti fenomeni:

- il fotone entrante espelle un elettrone dall'atomo con conseguente ribilanciamento dell'atomo: un elettrone dell'orbitale più esterno scende ad occupare la posizione vuota con perdita di energia emessa sotto forma di onda elettromagnetica;
- l'elettrone entrante non possiede energia sufficiente ad espellere l'elettrone contenuto in un orbita del nucleo costituente il materiale ma lo allontana dall'orbita; ciò consente all'elettrone urtato di rientrare sulla propria orbita con l'emissione di energia sotto forma di onde elettromagnetiche;
- l'elettrone entrante interagisce con il nucleo del materiale che essendo fortemente positivo (avendo un elevato numero atomico) rispetto all'elettrone lo frena e gli fa cambiare direzione; l'energia che si libera nella frenata viene espulsa sotto forma di onda elettromagnetica; tali raggi sono detti continui in quanto gli elettroni passano a diverse distanze dal nucleo coprendo con continuità lo spettro di emissione.

L'energia e il potere di penetrazione dei raggi X sono tanto più grandi quanto più alto è il numero atomico dell'elemento colpito e quanto più alta è la velocità degli elettroni che lo colpiscono.

L'anticatodo è generalmente eseguito in tungsteno, sia perché il numero atomico di questo metallo è alto, sia perché possiede un punto di fusione elevato (3400°C ca.).

E' indispensabile usare un metallo a punto di fusione elevato sia per la massiccia quantità di calore dissipata in concomitanza alla generazione dei raggi X, che per il bombardamento elettronico concentrato su un'area ridottissima.

Solo una parte (0,1 % a 30 keV, 1 % a 200 keV, 40% da 30 a 40 MeV) dell'energia cinetica degli elettroni viene convertita in raggi X, mentre tutto il resto si trasforma in calore.

Nella maggior parte degli apparecchi a raggi X il flusso viene misurato in base alla corrente di elettroni che attraversa il tubo, espressa in milliAmpere (mA), di conseguenza l'esposizione si misura in mA per min.

La superficie dell'anticatodo colpita dagli elettroni viene detta "punto focale" o "fuoco"; è importante che questa superficie sia sufficientemente grande sia per evitare il surriscaldamento locale, che potrebbe deteriorare l'anticatodo, che per consentire una rapida dissipazione del calore.

Ai fini della radiografia, tuttavia, il punto focale deve essere più piccolo possibile.

Definito il "carico locale" sul punto focale in Watt su mm² (ad es. 200 W/mm²), risulta che è possibile applicare un carico relativamente più elevato a un' area focale di piccole dimensioni che non ad una di grandi dimensioni, perché nei due casi il calore non viene dissipato dal centro allo stesso modo.

La proiezione del punto focale su un piano perpendicolare all'asse del fascio di raggi X viene detta "sezione efficace del punto focale" o "sezione focale" (Figura 12).

Per ottenere immagini radiografiche di massima nitidezza la sezione focale deve essere più piccola possibile; questa ultima è determinata da:

- dimensioni del punto focale;
- valore dell'angolo "a" (Figura 12)

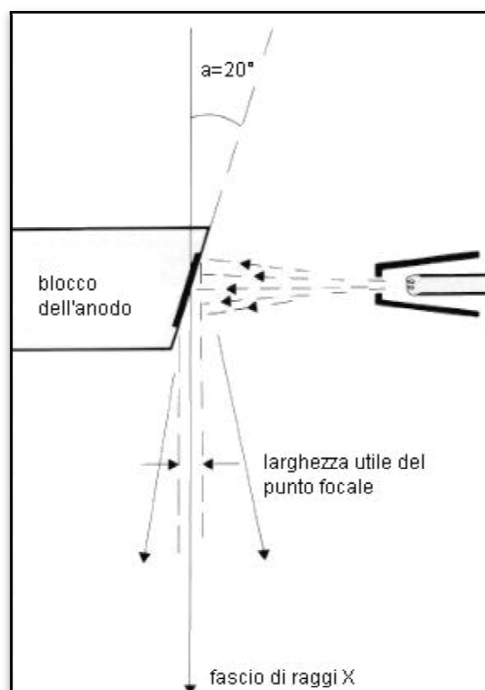


Figura 12: Particolare del tubo radiogeno

E' importante segnalare che quando in radiografia si parla di "sezione focale" senza nessun'altra specificazione, s'intende indicare generalmente la sezione efficace del punto focale

Nel C.R. Trisaia è disponibile un tubo radiogeno (vedi fig. n.14) in bunker avente le seguenti caratteristiche:

Modello Philips	MCN 451
Tensione massima	450 KV
Corrente massima	10 mA
Potenza massima	4.500 W
Filtrazione	5 mm Berillio
Apertura fascio	45°
Resa radiometrica	59,8 mGy/min mA
Protezione	<10,0 mGy/h

Tabella 3: Caratteristiche del tubo radiogeno nel C.R. Trisaia



Figura 13: Bunker radiologico C.R. Trisaia

2.4.5.3 Applicabilità

I metodi non distruttivi radiografici e radiometrici con raggi penetranti X sono relativamente poco conosciuti e poco utilizzati per indagini su strutture in cemento armato o cemento precompresso.

Questo è dovuto in primo luogo alla mancanza di conoscenze sulle loro possibilità e solo in secondo luogo alle riserve suscitate dalle misure particolari di protezione e dal loro costo elevato.

Le prove non distruttive radiografiche e radiometriche presentano delle caratteristiche specifiche quando sono applicate alle strutture in calcestruzzo, che derivano soprattutto dai grandi spessori che devono essere attraversati dalle radiazioni.

Nelle applicazioni del metodo radiografico si ricorre alle sorgenti con le seguenti proprietà:

- grande intensità delle radiazioni, per una adeguata capacità di penetrazione;

- attività relativamente alta della sorgente, per ridurre al massimo il tempo di esposizione;
- impiego di radio-nuclidi con tempo di dimezzamento abbastanza grande, dovuto alla frequenza relativamente ridotta, delle applicazioni richieste.

In queste condizioni trovano utilizzo, nel campo della radiografia del calcestruzzo, le seguenti sorgenti di radiazioni penetranti:

- cobalto 60;
- cesio 137;
- iridio 192;
- raggi X ad alta tensione superiore ai 300 KeV.

Allo scopo di ridurre il tempo di esposizione la sperimentazione è stata spinta anche riguardo l'elemento detector adoperando pellicole molto sensibili, sensibili alla luce fluorescente, in abbinamento a schermi a sali fluorescenti oppure a schermi fluoro-metallici.

Interessante anche se non ancora sufficientemente sperimentato l'utilizzo di pellicole di carta a sviluppo termico.

Questi accorgimenti consentono l'esame di particolari con spessori in calcestruzzo di 50 cm, situazione che copre circa la metà dei casi in cui sarebbe richiesto un esame di questo tipo.

Andare al di sopra di questo limite diventa sempre più difficile ed è possibile, su un intervallo limitato a 80 100 cm, utilizzando generatori speciali di raggi di grandi durezza come il betatrone, il generatore di Van de Graff o acceleratori lineari.

Le applicazioni del metodo radiografico, nel campo del calcestruzzo, possono essere raggruppate in due categorie:

- applicazioni su strutture in cemento armato;
- applicazioni su strutture in cemento armato precompresso.

Nell'ambito dell'applicazione del metodo radiografico su strutture in cemento armato riguardano due classi di problemi:

- determinazione dei ferri d'armatura esistenti in un elemento di cemento armato;
- determinazione dello sviluppo dei difetti nascosti o parzialmente nascosti.

Per quanto riguarda la determinazione dei ferri d'armatura possiamo individuare tre classi di elementi:

- solette;
- travi ed archi;
- pilastri e diaframmi.

Per ciò che concerne l'applicazione del RT su strutture in cemento armato precompresso riguardano, oltre alle applicazioni comuni nel campo della difetto scopia del calcestruzzo, alcuni problemi specifici come:

- controllo dell'iniezione dei cavi di precompressione;
- identificazione di eventuali fili rotti nei cavi di precompressione;
- identificazione di un eventuale stato di corrosione avanzata nei cavi di precompressione.

E' essenziale, preliminarmente per il controllo dell'iniezione dei cavi di precompressione, conoscere il materiale utilizzato per il riempimento delle guaine. I materiali più utilizzati sono:

- malta cementizia;
- resina epossidica;
- olio neutro.

L'interpretazione dell'immagine radiografica è determinata dalle diverse proprietà di assorbimento dei raggi penetranti su questi eccipienti. Si devono osservare le seguenti condizioni:

- il controllo deve essere iniziato nei punti lontani da quello di iniezione del materiale;
- la direzione di irradiazione deve essere parallela allo sviluppo massimo del vuoto nella guaina;
- la direzione di irradiazione deve essere parallela allo spessore minimo dell'elemento;
- la pellicola deve essere posizionata il più vicino possibile al cavo da radiografare.

In questo caso la densità ottimale di annerimento della pellicola è compresa tra 0.1 e 0.5.

Per quanto riguarda l'interpretazione della pellicola radiografica se l'iniezione è stata fatta con malta cementizia, allora un'iniezione è corretta quando la densità di annerimento su tutta la proiezione della guaina sulla

pellicola è praticamente uguale a quella corrispondente alle zone con solo calcestruzzo.

Questa interpretazione non può essere estesa nei casi di iniezione con resine epossidiche e tanto meno con olio.

Anche per l'identificazione di eventuali fili rotti nei cavi di precompressione si devono adottare i suggerimenti precedentemente descritti.

L'identificazione di un eventuale stato di corrosione dei fili di cavi di precompressione è un problema ben più delicato e non può essere risolto in condizioni soddisfacenti che solo nel caso di un processo di corrosione ben avanzato.

Di fatto per poter dire in base all'esame radiografico che si è sviluppato un processo di corrosione sui cavi di precompressione, la diminuzione della sezione attiva del filo deve essere tale da poter essere osservata sulla radiografia.

Il principio del metodo è basato sulla differenza di intensità tra l'acciaio ed i prodotti di corrosione particolarmente l'ossido di ferro.

2.6 Carbonatazione

L'indagine ha lo scopo di misurare la profondità di carbonatazione dello strato superficiale del calcestruzzo. La carbonatazione aumenta la durezza superficiale del calcestruzzo

Il calcestruzzo possiede un valore di pH di circa 12,5, cosa che gli conferisce un carattere fortemente alcalino. Questa forte alcalinità costituisce una protezione naturale dell'armatura contro la corrosione (passivazione).

Il fenomeno chimico è conseguente all'anidride carbonica dell'aria che penetrando nei pori del calcestruzzo neutralizza la calce libera presente. Il pH dello strato superficiale del calcestruzzo si abbassa fino a scendere a 9, provocando il fenomeno della carbonatazione.

In questo stato il calcestruzzo è fortemente permeabile e riduce la capacità protettiva; fornisce inoltre, allo strato superficiale, una durezza superiore che tende ad ingannare i metodi di determinazione della resistenza a compressione misurati con sclerometro e pull-out.

Quando il copriferro è carbonatato per tutto lo spessore protettivo delle armature, la situazione cambia. Prescindendo dall'eventuale presenza di cloruri, che aggraverebbe la situazione, la corrosione si produce velocemente solo nelle zone soggette a dilavamento o per U.R.>90%. In queste circostanze l'aumento di volume prodotto dall'ossido di ferro produce l'espulsione del copriferro e, di conseguenza, un incremento del fenomeno della corrosione. Nelle altre zone, all'interno di edifici o aree schermate dalla pioggia, il fenomeno della corrosione rimane trascurabile.

2.6.1 Fattori ambientali

In questa parte vengono analizzate le condizioni ambientali in termini di condizioni interne ed esterne aggressive che influenzano la durabilità della struttura e vengono studiate le caratteristiche meccaniche dipendenti dal fattore tempo .

Nell'analisi dei fattori ambientali distinguiamo gli effetti di condizioni ambientali specificatamente individuate come gli effetti di attacchi chimici, termici, di radiazioni UV, del fuoco.

Fenomeni dipendenti dal trascorrere del tempo possono aver luogo all'interno dei materiali componenti (matrice cementizia e armatura) e all'interfaccia.

Bisogna tener presente che gli effetti sinergici (dovuti alla combinazione di diversi fattori ambientali, sia in presenza che in assenza di carico), sono conosciuti nel loro effetto di amplificazione degli effetti singoli, e che nella realtà, tale combinazione concorre nella maggior parte dei casi a più severe condizioni di degrado.

2.6.2 Attacchi chimici

Solfati.

Nelle acque ricche di solfati ($\text{SO}_4^{=}$), come le acque di mare, questi si combinano con gli alluminati del calcestruzzo formando un solfoalluminato di calcio idrato noto come ettringite.

Questa reazione causa un aumento di volume per cui le parti corticali del calcestruzzo si gonfiano e producono fessurazioni che espongono la massa interna del calcestruzzo al degrado.

In ambienti marini si rende quindi necessario l'uso di cementi pozzolanici o d'altoforno, questi infatti a causa della modesta quantità di calce libera presente, sono poco soggetti alla formazione dell'ettringite.

E' inoltre opportuno realizzare in questi casi calcestruzzi poco porosi e quindi con bassi rapporti acqua/cemento.

Solfuri

I solfuri ($S^{=}$) e l' H_2S causano attacco acido del materiale contro il quale è necessario prevedere intonaci di sostanze protettive (malte di resina epossidica). I solfuri sono presenti in terreni argillosi ricchi di pirite.

Anidride carbonica.

L'anidride carbonica (CO_2) presente in acque di montagna attacca i carbonati con formazione di bicarbonati solubili che causano il dilavamento del calcestruzzo.

Anche in presenza di tali condizioni è utile ricorrere a cementi pozzolanici o d'altoforno, e comunque realizzare calcestruzzi impermeabili con il giusto rapporto acqua/cemento.

La carbonatazione è un fenomeno grave e frequente caratteristico delle strutture esposte all'aria.

Al contatto con l'anidride carbonica presente nell'aria, specialmente in atmosfere ricche di questo gas, la calce presente nel calcestruzzo ($Ca(OH)_2$), si trasforma in carbonato di calcio con gravi conseguenze sulle armature.

Infatti il copriferro, con il suo PH elevato, esplica una funzione di protezione delle armature ossidate in superficie, che in ambiente basico mantengono una pellicola di ossido in superficie.

Il fenomeno della carbonatazione causa un abbassamento del PH da circa 12,5 a circa 9 facendo così venire meno le condizioni per una efficace protezione delle armature che si degradano riducendo la loro sezione efficace e facendo "saltare" il copriferro così da esporre sempre di più agli attacchi esterni il calcestruzzo armato.

Tali problemi sono ancora più evidenti negli elementi in c.a.p. per le elevate tensioni di lavoro utilizzate in tale materiale.

Per ridurre i rischi di carbonatazione si possono impiegare appositi additivi oltre che verificare le sezioni alla fessurazione e adottare idonei spessori di copriferro.

Cloruri.

I cloruri (Cl⁻) attaccano direttamente le armature distruggendo la pellicola di ossido protettivo che le ricopre.

Sono particolarmente esposti a questo agente i manufatti realizzati in ambiente marino e le travi che sorreggono ponti stradali in zone dal clima freddo per l'uso di spargere sali allo scopo di favorire lo scioglimento della neve e del ghiaccio.

Alcali aggregati.

Un altro attacco chimico ai danni del calcestruzzo avviene da parte degli alcali aggregati (Na⁺ e K⁺) soprattutto per calcestruzzi confezionati con aggregati silicei contenenti elevate percentuali di silice amorfa o forme criptocristalline.

In questi casi è necessario verificare la compatibilità del cemento con gli inerti silicei per evitare la formazione di un silicato alcalino gelatinoso che si espande disgregando il calcestruzzo.

2.6.3 Effetti termici

Le variazioni di temperatura che avvengono a cavallo dello 0 °C sono molto più pericolose delle altre, anche di maggiore entità, che vengono normalmente prese in considerazione durante la progettazione.

Per fortuna il comportamento viscoso del calcestruzzo (per la gradualità con cui avvengono le variazioni), unito alla duttilità delle strutture (che permette deformazioni plastiche), permette di assorbire le punte di tensione che nascerebbero dai calcoli in regime perfettamente elastico delle variazioni termiche.

Tali tensioni imporrebbero altrimenti onerosi accorgimenti.

L'unico vero accorgimento che in strutture di grande dimensione planimetrica possa ovviare all'azione delle variazioni termiche è l'inserimento di giunti di dilatazione.

Variazioni termiche, specialmente se cicliche, causano stati di coazione tra gli inerti e la pasta cementizia che compongono il calcestruzzo. Infatti i coefficienti di dilatazione termica dei due materiali, pur essendo tra di loro confrontabili, non sono uguali.

	$\alpha (^{\circ}\text{C}^{-1})$
Cemento	$0,9 \cdot 10^{-5}$
Inerti calcarei	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Inerti silicei	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Tabella 4: Coefficienti di dilatazione termica

I getti vanno effettuati con la certezza che la temperatura non sia vicina allo 0 °C.

In tali condizioni infatti l'idratazione del cemento avviene con una eccessiva lentezza che porta a scarse resistenze meccaniche del conglomerato.

Per evitare l'insorgere di questi problemi si può effettuare l'aggiunta di additivi acceleranti come il cloruro di calcio oppure provvedere alla copertura del getto ed eventualmente al suo riscaldamento per insufflaggio di aria calda.

I cicli termici attorno allo 0 °C sono dannosi anche per le strutture che hanno già subito la stagionatura.

Infatti in tali condizioni l'acqua assorbita dal calcestruzzo per capillarità, gela aumentando di volume e causando gravi conseguenze se l'umidità del conglomerato supera un valore critico pari a circa il 92 % dei vuoti totali.

Oltre questi limiti l'aumento di volume dell'acqua gelata non può essere compensato dai vuoti e causa sicuramente danni per disgregazione del calcestruzzo.

Un rimedio contro questo pericolo è rappresentato dall'utilizzo di calcestruzzo con buona compattezza e quindi scarsa tendenza ad assorbire acqua.

Un altro rimedio consiste nella creazione di micro bolle nella massa di calcestruzzo per mezzo di additivi aeranti che agiscono per via chimica come alluminio, zinco e magnesio, o fisica come i tensioattivi.

In tal modo si rende la massa di conglomerato meno conduttrice di calore e quindi meno sensibile agli effetti termici; inoltre le micro-bolle creano degli sfoghi per l'acqua di capillarità quando questa aumenta di volume.

I volumi d'aria che si creano con questo metodo sono dell'ordine del $3 \div 4 \%$ e causano abbattimenti della resistenza fino al 20% .

Effetti delle radiazioni ultraviolette

L'esposizione alla luce solare ed in particolare alla radiazione ultravioletta a più alta energia, può favorire i processi endotermici di degrado del calcestruzzo, come il processo di carbonatazione o il processo di corrosione delle armature.

Capitolo 3. Campagna Sperimentale

3.1 Prove in situ

Le attività in situ sono iniziate con un sopralluogo conoscitivo della struttura. Si è cercato di reperire dei disegni costruttivi dell'edificio. Sul cantiere sono state rinvenute alcune planimetrie del complesso edilizio e alcune sezioni degli edifici. Si è proceduto ad un rilievo della struttura su cui si sarebbero dovute realizzare le attività diagnostiche non distruttive in parallelo a quelle distruttive.

In relazione a tale operazione si è giunti alla definizione specifica delle indagini da eseguire ed alla individuazione dei vari pilastri su cui stabilire le stazioni di prova. La scelta degli elementi da indagare è stata guidata dallo studio dei carichi a cui l'edificio era sottoposto e dalla maggiore o minore esposizione agli agenti atmosferici particolarmente aggressivi considerando la posizione a ridosso del mare ed il fatto che la struttura era rimasta completamente esposta alle stesse per più di dieci anni.

Si è deciso di procedere quindi con la realizzazione delle seguenti prove diagnostiche:

Prove non distruttive

- indagine pacometrica
- indagine sclerometria
- indagine ultrasonica
- indagine termografica
- misura della profondità di carbonatazione

Prove distruttive

- carotaggi
- microcarotaggi

3.2 Prove non distruttive

Questo tipo di diagnostica sugli edifici deve poter riunire le seguenti potenzialità (N. Labia & F.Lazzaroni):

- conservazione integrità oggetto esaminato;
- globalità di informazioni;
- capacità di fornire dati sia qualitativi che quantitativi.

Le indagini non distruttive possono classificarsi in due grandi gruppi:

INDAGINI PASSIVE - Le indagini di tipo passivo, fanno riferimento a quei fenomeni fisici che si verificano naturalmente e che consentono di essere rilevati, tramite la strumentazione, senza richiedere interventi artificiali di stimolazione.

INDAGINI ATTIVE - Le indagini di tipo attivo, sono quelle che richiedono anche in minima misura, un'eccitazione artificiale (meccanica, elettrica, termica, ecc.) dipendente quest'ultima dai fenomeni fisici che gli strumenti sono in grado di rilevare.

3.2.1 Indagine Pacometrica

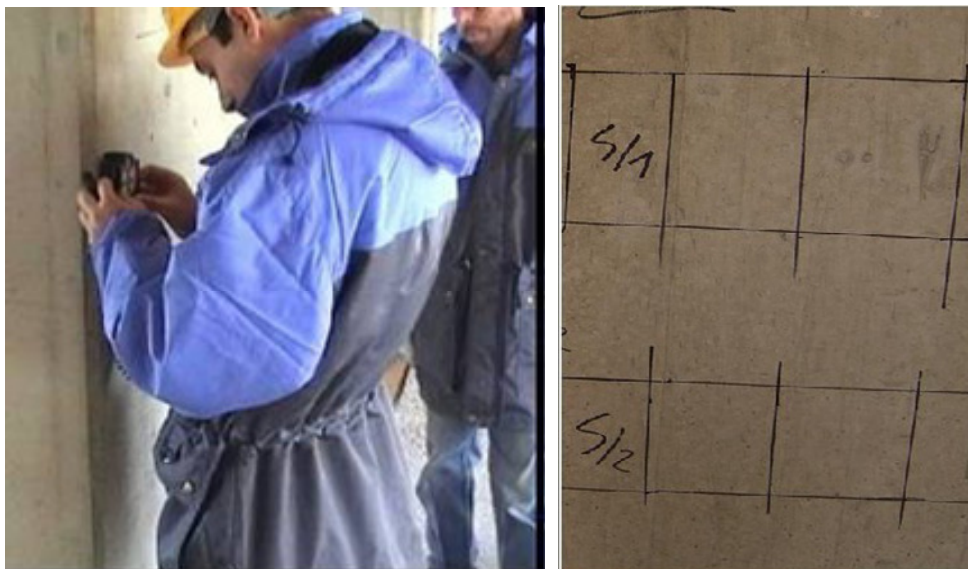


Figura 14: Prove paco metriche

Il funzionamento del pacometro utilizzato nelle attività svolte nel cantiere di Punta Perotti a Bari si basa sul principio delle correnti di Foucault ed

assicura una stabilità delle misure superiore rispetto a quelle che vengono fornite dagli strumenti a riluttanza magnetica.

Questa indagine ha permesso di individuare e localizzare le barre di armatura poste all'interno dei getti di calcestruzzo costituendo quindi fase fondamentale di preparazione delle indagini sclerometriche ed ultrasoniche. Con questa attività, svolta secondo la norma BS 1881:2004, è stato quindi possibile definire in maniera univoca sulla superficie delle strutture in cemento armato, la posizione di ferri e staffe ed individuare quindi le diverse stazioni di prova.

3.2.2 Indagine Sclerometria

Lo sclerometro, il cui utilizzo è normato dalla UNI 9189, è costituito da una massa battente posta in contrasto ad un'asta di percussione a contatto della superficie di prova.

La tecnica permette di misurare l'indice di rimbalzo che è correlato tramite apposite tabelle al valore della durezza superficiale.

Resta in ogni caso presente il limite dello strumento legato alla scarsa profondità dell'indagine, alla capacità di fornire solo un dato relativo alla resistenza locale e dal fatto di essere influenzato significativamente dalle condizioni dello strato superficiale.

Le prove sclerometriche sono state effettuate ortogonalmente alle facce seguendo le indicazioni contenute nella norma UNI EN 12504-2 (UNI EN, 2001). Una volta individuata la stazione di prova, la superficie di calcestruzzo è stata levigata con una particolare pietra in dotazione allo sclerometro. A distanza di 3cm dai ferri di armature, individuati attraverso l'indagine pacometrica, è stata disegnata una griglia di punti con passo sempre di 3 cm. Prima di procedere alla misurazione dell'indice di rimbalzo si è proceduto alla taratura dello sclerometro, utilizzando l'apposita incudine di taratura. Si è verificato che l'indice di rimbalzo misurato dallo strumento nelle dieci battute nell'incudine fossero pari al valore 80 circa, ammettendo uno scarto di 2. Su ogni punto della griglia è stata eseguita la prova sclerometria, rilevando il valore dell'indice di rimbalzo e verificando che la superficie di calcestruzzo non fosse scheggiata nel punto di battuta del puntatore dello strumento per la presenza di irregolarità nel conglomerato

cementizio o dell'inerte (in tal caso la misura doveva essere scartata). Per ogni stazione sono state effettuate almeno 9 misurazioni. In tutte le misure si è avuto cura di non eseguire misurazioni sclerometri che negli stessi punti. Le prove ultrasoniche, utilizzate tra l'altro anche al fine di individuare eventuali difetti e danneggiamenti del calcestruzzo come ad esempio fessure, cavità ecc., sono state condotte seguendo le indicazioni della norma UNI EN 12504-4 (UNI EN, 2005).



Figura 15: Prove sclerometriche

3.2.3 Indagine Ultrasonica

Il termine ultrasonico è usato per descrivere le vibrazioni a frequenza superiore a 20.000Hz.

Il metodo si basa su impulsi che sono prodotti da trasduttori piezoelettrici e propagati nell'elemento da provare attraverso un mezzo di accoppiamento.

Dopo aver percorso una traiettoria di lunghezza L l'impulso viene ricevuto da un secondo trasduttore che lo trasforma in un segnale elettrico.

Le metodologie di prova possono essere eseguite in maniera diretta (sonde su due facce opposte), in maniera indiretta (sonde sulla stessa faccia) ed in maniera semidiretta (sonde su due facce adiacenti).

Nelle attività svolte a Punta Perotti, seguendo la norma UNI 9524:1988/A1:1992, sono state realizzate principalmente misure di tipo diretto posizionando di volta in volta le sonde al centro delle stazioni sulle quali si erano realizzate in precedenza le battute sclerometriche.

Sono state comunque anche realizzate alcune misure col metodo indiretto allorquando si è trattato di indagare setti in cemento armato e non pilastri.



Figura 16: Prove ultrasonore

Tale tecnica permette comunque di eseguire prove su di un numero elevato di punti per giungere ad una migliore definizione delle caratteristiche complessive della struttura, consente di valutare la variazione della densità del materiale analizzato nell'arco del tempo ma presenta una parziale

possibile variabilità delle misure eseguite dovuta ad alterazioni causate dall'umidità e da altri fattori congiunturali.

In ogni stazione di prova sono state eseguite come minimo tre letture della velocità ultrasonora, avendo cura di staccare le sonde dalla superficie ogni volta e invertirle almeno una volta sulle due superfici di applicazione. In campo è stato utilizzato come accoppiante sonde - superficie del grasso.

3.2.4 Indagine Termografica

Ogni materiale emette con continuità energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, il suo spettro è diviso convenzionalmente in un certo numero di campi di lunghezza d'onda, detti bande e la più interessante per i fenomeni legati ai manufatti edilizi è quella dell'infrarosso. La tecnica rileva quindi le onde elettromagnetiche in funzione della loro temperatura e permette di misurare e definire la distribuzione superficiale della stessa su di un materiale a seguito di una sollecitazione di origine termica. Le eventuali anomalie presenti in tale mappa di distribuzione sono indice di possibili difetti e si è quindi in grado di rilevare anomalie strutturali e funzionali sia di singoli materiali che di strutture più complesse.

L'applicazione di tale tecnica nel cantiere di Punta Perotti ha riguardato in maniera specifica la ricerca e definizione del livello di umidità presente in alcuni setti murari maggiormente esposti a tale rischio.

La tecnica comunque consente la possibilità di effettuare le indagini in breve tempo, ed a distanza, permette di localizzare punti di crisi, considerando però che l'interpretazione dei termogrammi ottenuti richiede una notevole esperienza ed una adeguata preparazione specifica ricordandosi di tener sempre ben presente le condizioni al contorno che influiscono non poco sul processo di lettura e definizione dei risultati.

Nei casi esaminati in cantiere non sono stati rilevati difetti dei setti in calcestruzzo analizzati. Alla base dei setti nel piano interrato è stata notata zone umide dovute all'ascesa capillare dell'acqua.



Figura 17: Indagine termografica

3.2.5 Misura della profondità di carbonatazione

L'indagine consiste nello spalmare il liquido sulla superficie della carota dopo aver pulito accuratamente con uno straccio. La soluzione di fenoftaleina, all'1% di alcool etilico, reagisce col calcestruzzo provocando un cambiamento di colore, da bianco trasparente a rosso violetto, nella parte non carbonatata.



Figura 18: Prove di carbonatazione

L'analisi, generalmente, va condotta subito dopo il prelievo della carota per evitare che si formi un film superficiale carbonatato lungo tutta la superficie che impedirebbe la reazione con la fenoftaleina. Nel caso in esame sono state condotte le prove in situ solamente su alcune carote prelevate. Però si è provveduto subito dopo il prelievo al confezionamento di tutti i provini. Poi in laboratorio sono state eseguite con calma le prove di carbonatazione su tutte le carote.

La penetrazione della carbonatazione segue una legge parabolica del tipo:

$$s = k \sqrt[n]{t}$$

dove s è lo spessore dello strato carbonatato, t il tempo, mentre k è un coefficiente che dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo e dai fattori ambientali. In calcestruzzi porosi l'esponente n vale circa 2 e quindi si ottiene un andamento parabolico. In calcestruzzi compatti, la diminuzione nel tempo della velocità di carbonatazione è più marcata, per cui $n > 2$. In calcestruzzi molto impervi la velocità tende nel tempo praticamente ad annullarsi.

In generale k diminuisce assieme alla riduzione del rapporto acqua/cemento e/o garantendo una buona costipazione con stagionatura ad umido.

Il valore di k tende ad aumentare per umidità relative, U.R., comprese tra 50% e 70%, mentre tende a diminuire per U.R. basse, $< 40\%$, o alte, $> 90\%$.

Quando il copriferro è carbonatato per tutto lo spessore protettivo delle armature, la situazione cambia. Prescindendo dall'eventuale presenza di cloruri, che aggraverebbe la situazione, la corrosione si produce velocemente solo nelle zone soggette a dilavamento o per U.R. $> 90\%$. In queste circostanze l'aumento di volume prodotto dall'ossido di ferro produce l'espulsione del copriferro e, di conseguenza, un incremento del fenomeno della corrosione. Nelle altre zone, all'interno di edifici o aree schermate dalla pioggia, il fenomeno della corrosione rimane trascurabile.

Dalle prove effettuate si è riscontrato che mediamente lo strato di carbonatazione del calcestruzzo era circa di 3 cm.

3.3 Prove distruttive: carotaggi e microcarotaggi

Una delle prove meccaniche di tipo distruttivo più largamente utilizzata per poter definire le caratteristiche meccaniche degli elementi in cemento armato è sicuramente rappresentata dall'operazione di estrazione, in accordo con le norme UNI EN 12504-1:2002 e UNI 10766:1999, attraverso l'ausilio di apposite macchine carotatrici, di campioni cilindrici con diverso diametro e diversa lunghezza. Tali provini subiscono successivamente l'indagine per la definizione del livello di carbonatazione e la fase di rettifica per poter essere sottoposti alla prova a schiacciamento.



Figura 19: Rilievo dati post-carotaggio

Nelle attività svolte nel cantiere oggetto di indagine è stato possibile prelevare carote e microcarote nella quasi totalità delle stazioni di prova utilizzate per lo svolgimento delle attività descritte precedentemente in modo da riuscire ad ottenere tutta una serie di valori utili alla creazione di apposite curve di correlazione relative alle strutture di Punta Perotti.

L'utilizzo di provini estratti direttamente dalla struttura ci permette quindi di calcolare in maniera diretta il valore di rottura del materiale realizzato ed il suo livello di carbonatazione, richiedendo però elevati costi per il prelievo, significativa invasività sulla struttura ed una tendenziale sottostima delle caratteristiche meccaniche ottenute sui campioni alterati durante la fase di prelievo.

Per cercare di limitare il più possibile questo aspetto, carote e microcarote appena estratte sono state imballate singolarmente, trasportate e stoccate con la massima cura in modo da cercare di renderle il più indisturbate possibile.



Figura 20: Classificazione e imballaggio

3.4 Raccolta dati

Per raccogliere in maniera adeguata tutti i dati e valori relativi alle indagini eseguite ed agli elementi strutturali indagati, si è provveduto alla creazione di apposite schede utilizzate prima in campo e poi digitalizzate al fine di creare un vero e proprio database contenente tutti i risultati scaturiti dalle attività svolte sugli edifici in cemento armato del complesso di Punta Perotti prima che lo stesso fosse demolito.

L'insieme dei dati è poi stato studiato ed elaborato per cercare di avvalorare maggiormente l'effettiva validità delle tecniche diagnostiche non distruttive realizzate in sostituzione di quelle distruttive sempre nelle quantità prevista dalla normativa vigente

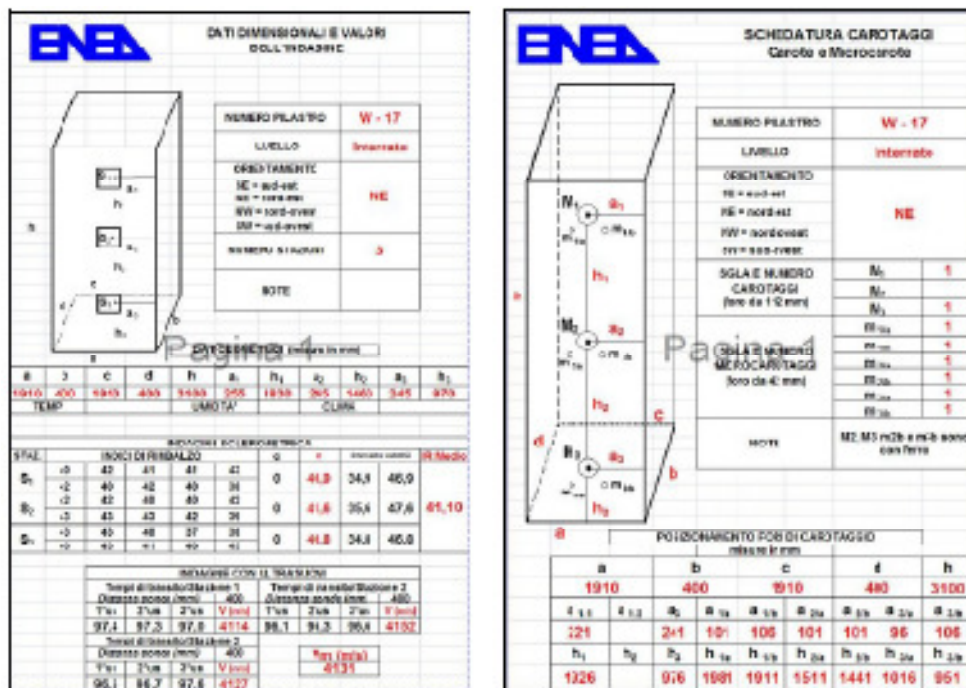


Figura 21: Raccolta dati

In conclusione si riporta di seguito la tabella in cui sono inseriti i totali degli elementi strutturali indagati, delle prove eseguite sugli stessi e dei campioni cilindrici prelevati.

TOTALE PILASTRI INDAGATI 89
PACOMETRIA SU 89 PILASTRI
SCLEROMETRIA SU 69 PILASTRI CON 298 STAZIONI
ULTRASUONI SU 64 PILASTRI CON 152 STAZIONI
181 CAROTE Ø 100
293 Ø 32

Tabella 5: Tabella riepilogativa delle prove in situ

3.5 Prove in laboratorio

Nell'ambito dello studio sulla resistenza e sulla durabilità dei materiali strutturali in particolare il calcestruzzo effettuato sugli edifici di Punta Perotti sono state condotte attività in laboratorio per verificare la correlazione tra le prove non distruttive, in particolare gli ultrasuoni, con le prove a compressione di provini cilindrici di diametro 100 mm e di diametro 32 mm estratti con il carotaggio. In particolare, le carote standard sono state rettificate, mentre le microcarote sono state tagliate in più parti, ottenendo provini, aventi rapporto altezza/diametro unitario. Pertanto dalle 293 microcarote prelevate sono state ricavate 654.

Inoltre si è voluto verificare la correlazione tra le misure ultrasonore effettuate in laboratorio e quelle in situ. E' stata condotta anche una campagna di misura confrontando diversi strumenti ultrasonori, valutando la loro efficienza e i loro limiti. E' stata presa in considerazione l'influenza dell'operatore sulla misura e il tipo di accoppiante utilizzato per il contatto sonda-campione. Le misure sono state effettuate su 181 carote standard e 654 carote piccole per un totale di 835 campioni. Le misure ultrasonore effettuate, con l'utilizzo di 3 strumenti diversi, ammontano a circa 7515 misure, considerando che su ogni carota le misure sono state eseguite tre volte. Le misure ultrasonore complessive effettuate sono 1629 per le carote grandi e 5886 per le carote piccole.

I risultati ottenuti sono stati compilati su un foglio elettronico ordinando i dati in funzione del piano e della sigla identificativa dell'elemento strutturale (pilastri), per calcolare la velocità ultrasonora media, il calcolo della densità dei singoli campioni e del rapporto dimensionale.

I dati mediati sono stati importati su un database dove la sigla del campione rappresenta la chiave di accesso alle misure relative. La banca dati può essere interrogata attraverso delle maschere di query per estrarre i dati da processare con altri programmi di analisi statistica e sono state create delle maschere per l'inserimento dei dati delle microcarote.

Per rendere ripetibili le misure ultrasonore è stato sviluppato un sistema a sonde non a contatto che esclude la variabile pressione esercitata dall'operatore sulla sonda (Tati et al., 2007).

L'ordinanza 3274 prescrive per il livello di conoscenza 3 prove esaustive su i materiali, in particolare l'esecuzione di prove invasive (carotaggi) e prove meccaniche. Il numero considerevole di prove non distruttive in campo, di prelievi di carote e di prove in laboratorio sia ultrasonore che meccaniche effettuare sugli edifici di Punta Perotti avvalora la tesi dell'ordinanza che prescrive per le prove non distruttive un numero 3 volte maggiore rispetto ai prelievi di materiale.

3.5.1 Le procedure

Le operazioni svolte in laboratorio sono state:

- Taglio e Rettifica dei provini cilindrici
- Peso e dimensioni dei campioni
- Misure ultrasonore
- Prove meccaniche
- Redazione Report in Excel
- Redazione Banca dati in Acces



Figura 22: Misure in laboratorio

Le norme di riferimento applicate alle prove sono state:

- Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza alla compressione dei provini UNI EN 12390-4:2002

- Calcestruzzo indurito. Rilievi microsismici mediante impulsi d' onde vibrazionali ad alta frequenza, in campioni o strutture di calcestruzzo semplice, armato o precompresso. UNI 9524:1989 + A1:1992

La rettifica dei provini è stata realizzata dalla GEOCAL di Cosenza tramite rettificatrice. I campioni sono stati misurati in termine di peso, altezza, diametro. Le facce sono state controllate e verificate secondo le norme UNI 9524:1989 + A1:1992

3.5.2 Misure ultrasonore

Gli strumenti utilizzati e confrontati sono stati (Tati et al., 2007):

- Strumento ultrasuoni marca Krautkramer con display integrato e interfaccia con pulsanti;
- Strumento ultrasuoni marca Sirio con display integrato interfaccia DOS;
- Strumento ultrasuoni marca Boviar, utilizzante come interfaccia utente un palmare.

Le procedure utilizzate per la misura delle velocità ultrasonora dei campioni sono state effettuate ad ogni inizio giornata ed ad ogni accensione degli strumenti. La procedura di zero prevede le sonde accoppiate direttamente e la verifica del tempo zero sulla base dei tempi dell'oscilloscopio. La misura sul campione di riferimento verifica il tempo di propagazione che deve essere uguale a quella scritta sullo stesso campione (provvisto di certificato di taratura) e corrisponde di solito a circa 50 μ sec.

La misura sui campioni viene effettuata ponendo il provino tra le due sonde, una trasmittente ed una ricevente, le facce sono bagnate di liquido accoppiante che garantisce il passaggio dell'onda ultrasonora (onda di compressione o longitudinale).

La misura viene effettuata 3 volte sullo stesso campione e i valori di velocità letti non devono discostarsi dal valore medio più del 2%. Tutte le carote di diametro 100 mm sono stati sottoposti alla misura ultrasonora dei tre strumenti provvisti ognuno di coppie di sonde di frequenza 50 KHz.

Sono state eseguite inoltre due prove supplementari che hanno riguardato:

- Il confronto tra misure effettuate sullo stesso campione e 6 operatori diversi questo per ogni strumento
- Il confronto tra misure di velocità e liquidi accoppianti diversi questo per ogni strumento



Figura 23: Misure ultrasonore in laboratorio

Le microcarote di diametro 32 mm sono state tagliate e rettificate secondo la norma in un rapporto altezza/diametro pari ad 1. Da ogni singola microcarota sono stati estratti fino a 5 provini cilindrici.

3.5.3 Prove meccaniche

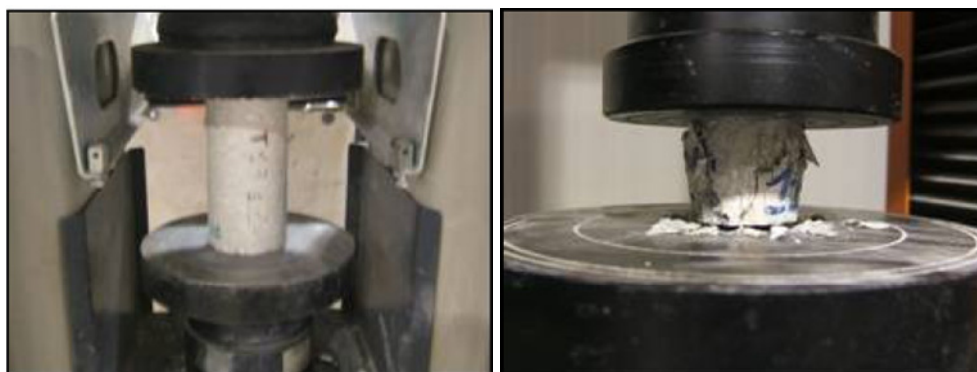


Figura 24: prove meccaniche

Le prove meccaniche di compressione sono state effettuate con macchina a compressione certificata sui provini cilindrici di sezione 100 mm e 33 mm estratti dall'edificio di Punta Perotti. Sono stati schiacciati ed è stato registrato il grafico resistenza a compressione/tempo dove il valore massimo è quello di rottura.

Inoltre sono stati analizzati il tipo di rottura in base alla normativa e annotando per quelle non a norma la sigla corrispondente allo schema:

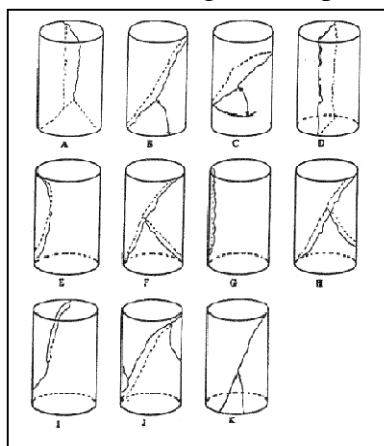


Figura 25: Tipo di rottura

Le misure sono state effettuate su 181 carote standard e 654 microcarote per un totale di 835 campioni.

3.5.4 Risultati

Le misure effettuate con tre strumenti diversi ha evidenziato scostamenti medi di circa 100 m/sec. La misura in campo ed in laboratorio effettuata con lo stesso strumento su piani diversi ha mostrato un andamento simile (figura 26).

Operatore diversi incidono nella misura ultrasonora con un errore di circa 50 m/sec fino ad un massimo di 150 m/Sec. Il liquido non influenza la misura in modo sostanziale.

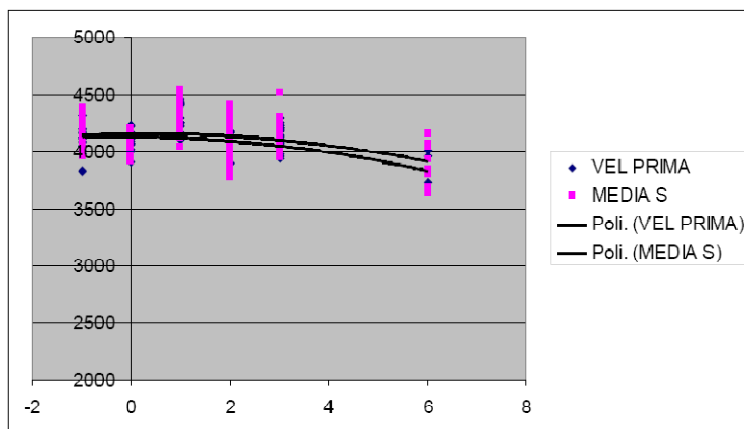


Figura 26: Correlazione tra le misure ultrasonore in situ ed in laboratorio in funzione dei piani dell'edificio (Tati et al., 2007)

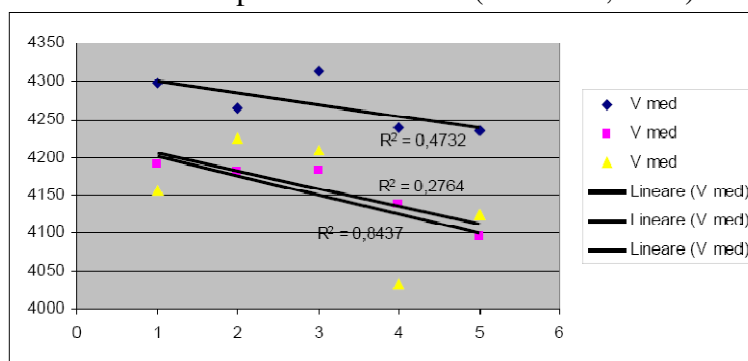


Figura 27: Confronto tra le misure ultrasonore effettuate sullo stesso campione ma da 5 operatori diversi (Tati et al., 2007)

3.6 Analisi radiografica sui pilastri prelevati dall'edificio di Punta Perotti

Dagli edifici demoliti di Punta Perotti sono stati prelevati 4 pilastri in c.a. e un nodo strutturale. Nel Centro Ricerca ENEA Trisaia sono state effettuate delle radiografie sui suddetti da parte dei tecnici ENEA (Verre & Ciappa, 2007)

L'analisi radiografica applicata alla ingegneria civile nasce dall' esigenza di reperire "informazioni immagine" piu' dettagliate possibile sulle geometrie dei ferri sul loro stato di corrosione sulla presenza di distacchi (crepe) tra essi ed il cemento. E' possibile valutare graficamente la compattezza dell'agglomerato cementizio nei vari punti.

L'evoluzione tecnologica, con l'utilizzo della radiografia digitale, ha sostituito il film con gli schermi IP apportando oltre ad una maggiore velocità di analisi anche ad un sensibile riduzione dei costi eliminando la lavorazione manuale dei film.



Figura 28: Complesso radiogeno Yxlon del C.R. ENEA Trisaia dotato di unità a potenziale costante con testa bipolare da kV 20- 450 mA 0,5-15 con movimentazione su tre assi

L'esperienza qui descritta si è svolta naturalmente in laboratorio ma si è comunque tentato di dare una valutazione alla applicabilità anche in "campo" usando gli schermi IP i quali grazie alla maggiore sensibilità rispetto ai film tradizionali permettono di utilizzare dei parametri d'esposizione piu' bassi costituendo un vantaggio in materia di radioprotezione in quanto si potranno utilizzare delle zone di rispetto piu' piccole.

L' indagine è stata eseguita su un campione di quattro pilastri in c.a. delle

seguenti dimensioni:

1. Pilastro 1 di sezione 22 x 34 cm lunghezza 160 cm;
2. Pilastro 2 sezione 22 x 50cm lunghezza 286cm con n°8 barre da 16mm;
3. Pilastro 3 sezione 30 x 80cm lunghezza 220cm con n°8 barre da 16mm;

Pilastro 4 sezione 30 x 80cm lunghezza 286cm con n°4 barre da 16mm e quattro barre da 20 mm.

I pilastri sono stati sezionati in 4 sezioni uguali alla grandezza di una lastra 30x 40 cm.

Strumentazione utilizzata

Tutti i film bi emulsione utilizzati in questa esperienza, sono stati acquisiti con uno scanner ad alta risoluzione e poi elaborati con un software dedicato per evidenziare al meglio, attraverso le varie funzioni del programma, le zone critiche in cui erano presenti bassi valori di contrasto.

L'acquisizione delle immagini è avvenuta con l'ottimizzazione dei valori di contrasto, relativamente alla scala dei toni di grigio. Il software del programma, inoltre, ha consentito di utilizzare una Maschera Digitale per ogni singolo film per modificare la zona di contrasto della lastra e contemporaneamente creare un'equalizzazione dell'immagine ottenuta, per evidenziare al meglio i difetti.

Sono state eseguite una estesa campagna radiografica sui suddetti pilastri. Nelle figure seguenti sono riportati i risultati fotografici (Verre & Ciappa).

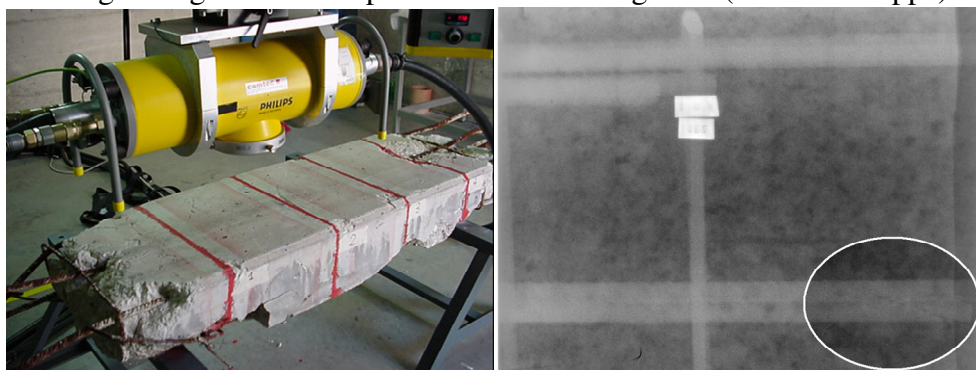


Figura 29: Pilastro 1, sezione 1 orizzontale e digitalizzazione radiografia (Verre & Ciappa, 2007)

L'elaborazione digitale evidenzia un distacco (area circoscritta in figura 29) della "cravatta" dal cemento ed inoltre principi di ossidazione sui ferri superiori.

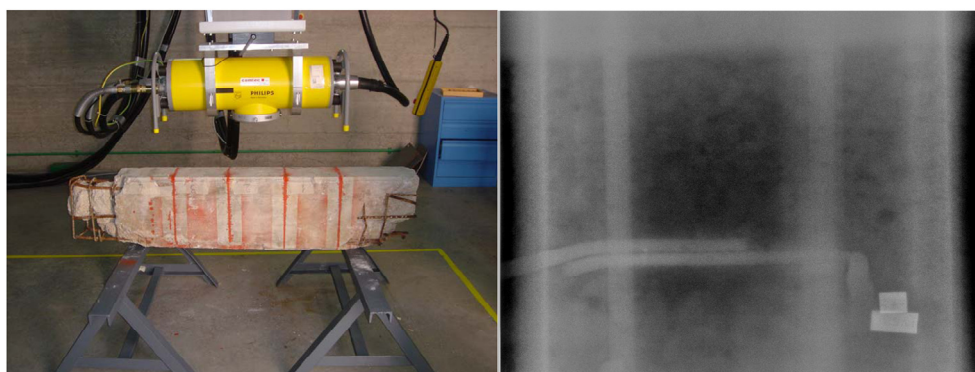


Figura 30: Pilastro 1 sezione 2 verticale e relativa digitalizzazione radiografica (Verre & Ciappa, 2007)

Si denota una buona conservazione dei ferri con una zona al centro degli stessi a maggiore densità radiografica che si traduce in realtà in una minore densità dell'conglomerato cementizio che si estende in alcuni punti anche oltre i ferri centrali.

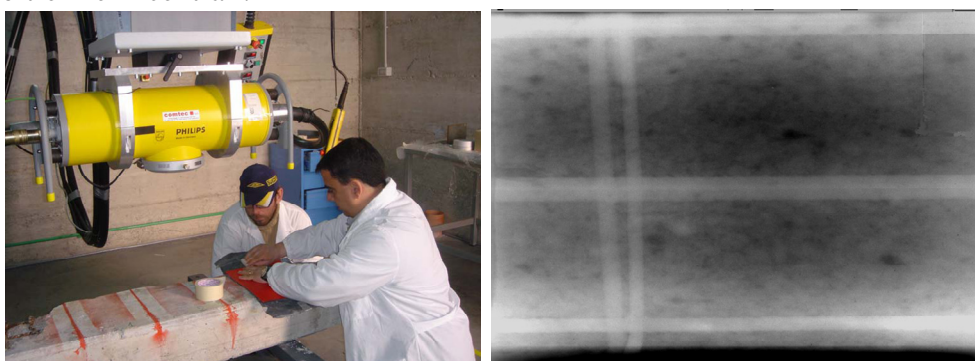


Figura 31: pilastro 2 sezione orizzontale e relativa digitalizzazione radiografica (Verre & Ciappa, 2007)

La radiografia in figura 31 ottenuta ruotando il plinto di 90° è la verifica di quanto assunto nella sez 2 vert. Infatti si evidenzia una linea di frattura che denota il limite di demarcazione della zona con minore densità radiografica (in alto) da quella con maggiore densità radiografica (in basso).

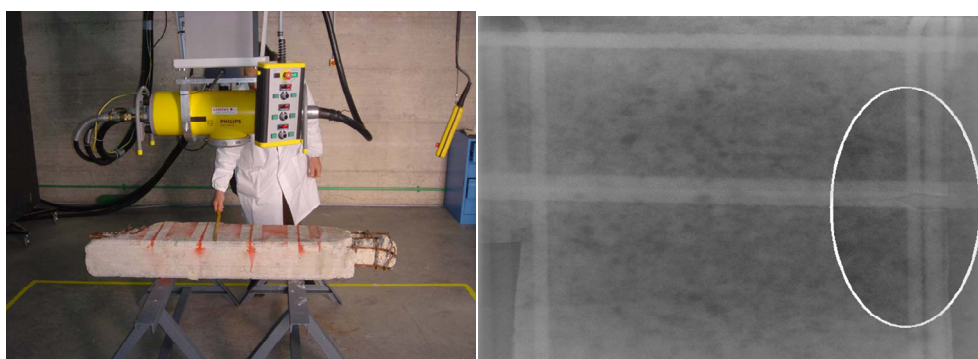


Figura 32: Pilastro 1 sez 3 orizzontale e relativa digitalizzazione radiografica (Verre & Ciappa, 2007)

La Roi denota un distacco dei ferri dal cemento che ha creato anche una ossidazione superficiale mentre la struttura cementizia risulta omogenea.

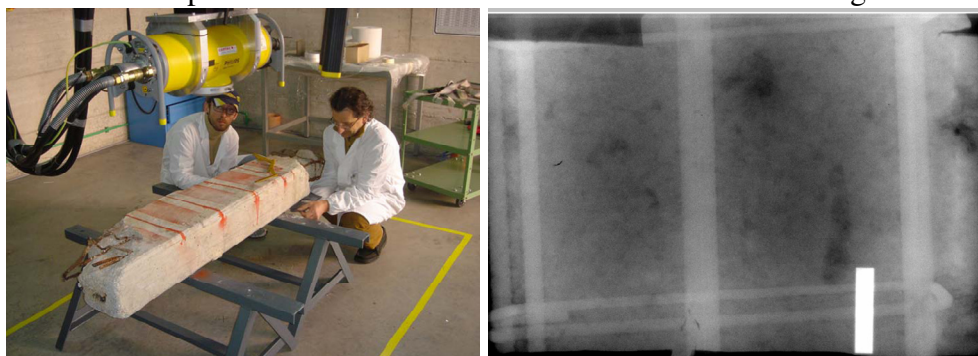


Figura 33: Pilastro 1 sez. 4 orizzontale (Verre & Ciappa, 2007)

L'analisi evidenzia un' area all'interno delle semigabbie in cui il cemento non è omogeneo e con la presenza di crepe.

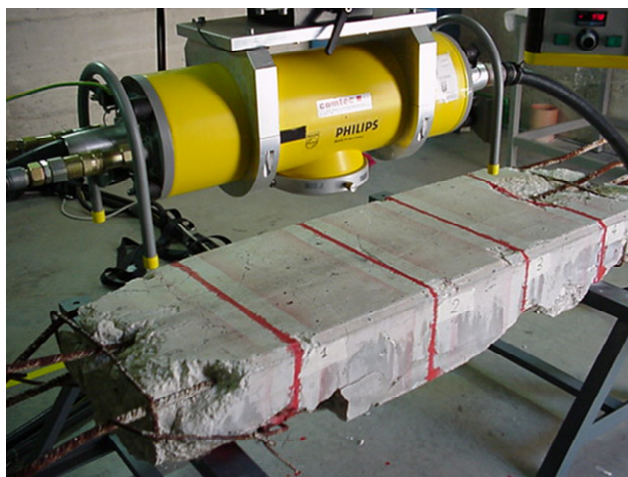


Figura 34: Pilastro 2 sez. A2 (Verre & Ciappa, 2007)

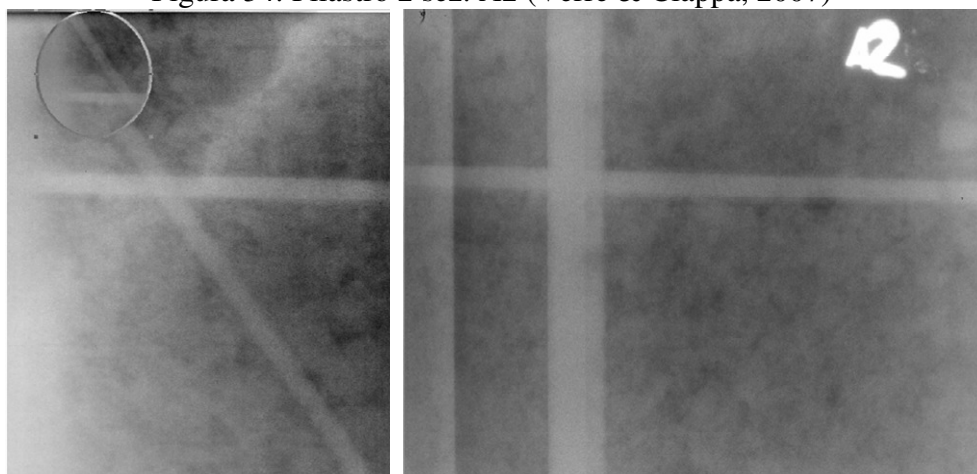


Figura 35: Pilastro 2 sez. A2, digitalizzazione di due lastre radiografiche (Verre & Ciappa, 2007)

In figura 35 sono riportate le digitalizzazioni di due pellicole radiografiche esposte contemporaneamente alla sorgente radiogena. L'analisi denota: nella prima a destra una ossidazione in alcuni punti dei ferri verticali e orizzontali, mentre nella seconda a sinistra lo stesso fenomeno di ossidazione ma anche una disomogeneità del conglomerato cementizio.

Plinto 2 sez A 4 -22 cm

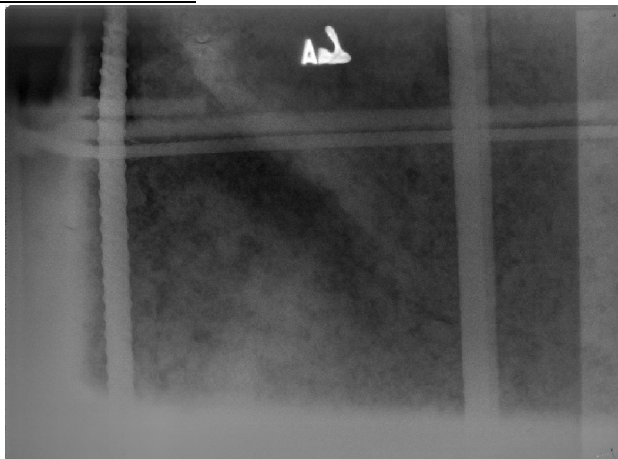


Figura 36: Digitalizzazione Radiografica Pilastro 2 sez A 4 (Verre & Ciappa, 2007)

In figura 36 si evidenzia una notevole disomogeneità del conglomerato cementizio mentre i ferri sono in buono stato di conservazione

Conclusioni

Si ritiene utile questo tipo di controllo per determinare i seguenti fattori (Verre & Ciappa, 2007):

- Lo stato di corrosione o i distacchi dei ferri all'interno della struttura cementizia;
- La geometria delle gabbie e i relativi diametri dei ferri;
- La possibilità di valutare la compattezza dell'agglomerato cementizio;
- Possibilità di interfacciare queste informazioni con analisi di sclerometria o con ultrasuoni per valutare le variazioni di velocità nel mezzo, e verificarne a pieno l'attendibilità.
- Costituire dei data base utili per la metodologia d'estrazione di carote

Capitolo 4. Elaborazione dei Dati di Prova

4.1 Valutazione della resistenza a compressione con prove non distruttive

Il passaggio dal generico parametro non distruttivo alla resistenza a compressione avviene attraverso l'impiego di correlazioni empiriche (G. Pascale ed al.). Questo passaggio, in aggiunta all'inevitabile errore di prova connesso alla determinazione sperimentale di qualunque grandezza, può comportare errori di entità anche notevole nella stima della resistenza a compressione.

La scelta del metodo, o dei metodi più adatti al caso in esame, richiede molta attenzione ed è di fondamentale importanza, sia per la validità delle conclusioni che si potranno trarre, sia per la rapidità ed economia dell'intervento.

I metodi non distruttivi utilizzati sono quello sclerometrico e quello ultrasonoro, per i quali è generalmente riconosciuta l'opportunità di un impiego combinato (Metodo Sonreb). I parametri che si determinano con questi metodi sono legati alle proprietà elastiche e alla densità del materiale. La correlazione multipla che li lega alla resistenza non è lineare, ed è influenzata in maniera da diversi fattori.

Qualunque sia il metodo impiegato, la correlazione deve essere adattata al caso in esame. Ciò può essere fatto mediante l'applicazione di coefficienti che dipendono dalla composizione del calcestruzzo e dai fattori igrometrici al momento delle prove. E' però preferibile, anche se più oneroso, determinare un coefficiente globale d'influenza, calcolato in base ad un confronto tra i valori di resistenza di un esiguo numero di carote e i valori di resistenza stimati in situ per via non distruttiva, nelle posizioni di prelievo delle carote (G. Pascale ed al.).

L'impiego dei metodi non distruttivi presenta quindi il duplice vantaggio di guidare la scelta delle posizioni più opportune per il prelievo delle carote, e di poter estendere i risultati da esse forniti ad un elevato numero di elementi strutturali.

Ai metodi non distruttivi viene generalmente riconosciuta la capacità di rivelare le variazioni della resistenza di un calcestruzzo nel tempo. Nel caso della velocità degli ultrasuoni, è però necessario operare con molta cautela, perché essa è fortemente influenzata dall'umidità del getto. Per un calcestruzzo che matura in aria, la perdita d'acqua per evaporazione limita l'idratazione, e quindi lo sviluppo della resistenza, ma influenza in maniera ancor più sensibile la trasmissione di onde ultrasoniche. Infatti l'acqua contenuta nei macropori viene gradualmente sostituita dall'aria, che ha un' permeanza acustica molto minore.

4.2 Analisi dei dati

Dopo le prove in campo e in laboratorio i dati raccolti sono stati catalogati in formato digitale. Il particolare ad ogni stazione di misura delle prove ultrasonore sono state collegati i dati ricavati dalle prove sclerometriche, condotte, evidentemente, in campo, le prove ultrasonore eseguite in situ e in laboratorio e infine il valore di rottura a compressione, ottenuto dallo schiacciamento delle carote.

Come accennato nel capitolo precedente dal confronto non si è notato una differenza significativa delle velocità ultrasonore (ordine di $10 \div 20$ m/sec su una velocità ultrasonore mediamente superiore a 3800m/sec.) effettuate in situ e in laboratorio su ogni singolo campione,. La differenza dipendeva più dall'incidenza del singolo operatore nell'esecuzione della misura che da altri fattori. Le prove in situ sono state comunque condotte nell'arco temporale di circa 30 giorni: dal 20 marzo 2006 al 20 aprile 2006. Anche se in condizioni climatiche diverse ma comunque su pilastri riparati dalle precipitazioni piovose. Inoltre l'edificio era ubicato in una zona particolarmente ventosa e a ridosso del mare, per cui il calcestruzzo, presumibilmente, nel breve arco di tempo delle prove non ha subito forti variazioni termo-igometriche.

I dati poi sono stati suddivisi per piano dell'edificio e, evidentemente tra carote standar diametro $\varnothing 100$ mm e microcarote con diametro $\varnothing 32$ mm così ottenuti sono stati elaborati utilizzando le formule di correlazione, ricavate da alcune pubblicazione nel settore. I dati così elaborati sono stati

rappresentati in diagrammi, in cui il valore della resistenza ricavata è stato confrontato direttamente con il rispettivo valore della resistenza a compressione del provino. Pertanto, sull'asse delle ascisse sono riportati i valori reali della resistenza a compressione del provino e sull'asse delle ordinate quello calcolato (figura 37):

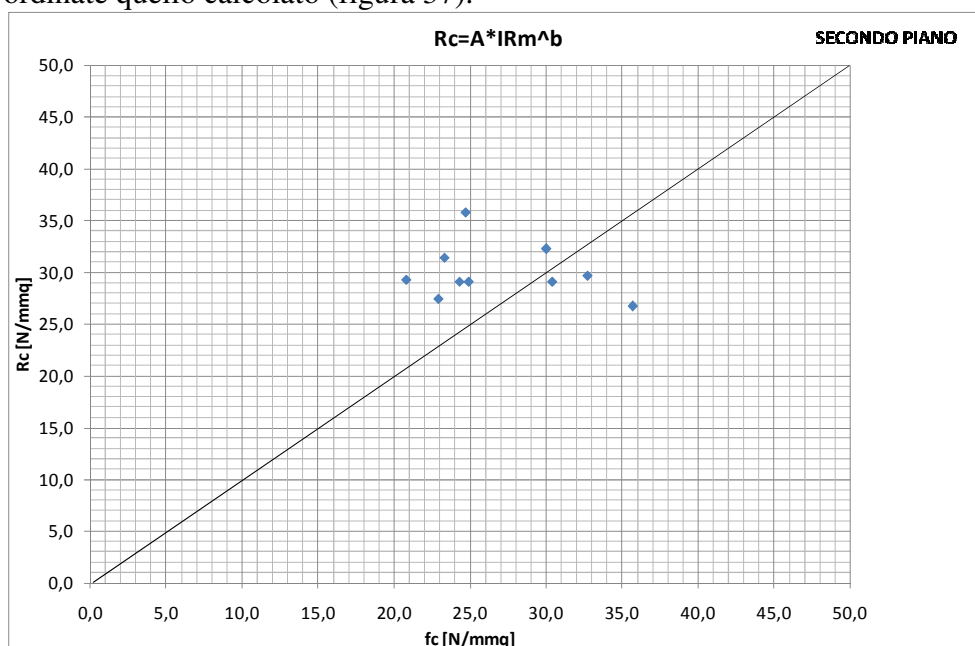


Figura 37: Grafico tipico relativo alla correlazione $R_c = A \cdot I_{R_m}^b$

I valori si trova al di sopra della diagonale al grafico indicano che le resistenze calcolate con la formula di correlazione utilizzata è superiore a quella effettiva. Viceversa se i valori sono al di sotto della diagonale i valori calcolati sono inferiori a quelli effettivi.

Nel caso specifico del diagramma riportato sopra si vede che la la resistenza calcolata con la formula $R_c = A \cdot I_{R_m}^b$ varia da 26 a 36 N/mm², mentre quella reale del provino varia da 20 a 36 N/mm².

Sono state utilizzate formule di correlazione sia delle singole indagini non distruttive che quelle con il metodo combinato, come specificato nei seguenti paragrafi.

Sono stati anche calcolati gli “scarti quadratici” per valutare lo scostamento dei valori medi della resistenza calcolata da ciascun formula di correlazione.

In situ le indagini e i carotaggi sono stati eseguiti dal piano interrato al terzo piano a cui bisogna aggiungere il sesto piano.

4.3 Valutazione della resistenza con prove sclerometriche

Dalla letteratura (Menditto ed al.) è stata utilizzata una relazione tra la resistenza cilindrica del conglomerato (R) e l'indice di rimbalzo IRm una correlazione di tipo

$$R_{cil}=0,83 \times (0,0034 \times IRm^{2,5245})$$

Dall'analisi dei grafici riportati in appendice, si nota che i valori calcolati con tale formula sono abbastanza dispersi rispetto a quelli reali sia nel caso delle carote standard che nelle microcarote.

Dalla tabella n°16 relativa alla deviazione standard dal valore medio, si può notare una deviazione del 23% per le carote grandi, mentre nella tabella n°23 la stessa deviazione passa al 28% per le microcarote.

4.4 Valutazione della resistenza con prove ultrasonore

Dalla letteratura (Menditto ed al.) è stata utilizzata una relazione tra la resistenza cilindrica del conglomerato (R) e la velocità ultrasonora V una correlazione di tipo

$$R_{cil}=0,83 \times (-5 + (18000/5000-V)) \quad [4.1]$$

Altre relazione tra la resistenza cilindrica del conglomerato (R) e la velocità ultrasonora V utilizzate sono le seguenti:

$$R=(-307+0,157 \times V)/10 \quad (\text{in Nmm-2}) \quad (\text{R. Giannini})$$

$$R=(1,88 \times 10^{-21}) \times V^{6,184} \quad (\text{in Nmm-2}) \quad (\text{Hisham, Y.Qasrawi})$$

Utilizzando le formule legate solamente alla velocità ultrasonora, si nota che in tutti i casi la formula [4.1] è molto cautelativa rispetto alle altre. In

particolare per le carote standard sottostima i valori della resistenza cilindrica rispetto a quelli effettivi. Anche la deviazione standard è la più bassa per tutti i casi esaminati. E' di circa il 12% (tabella 16 e 23).

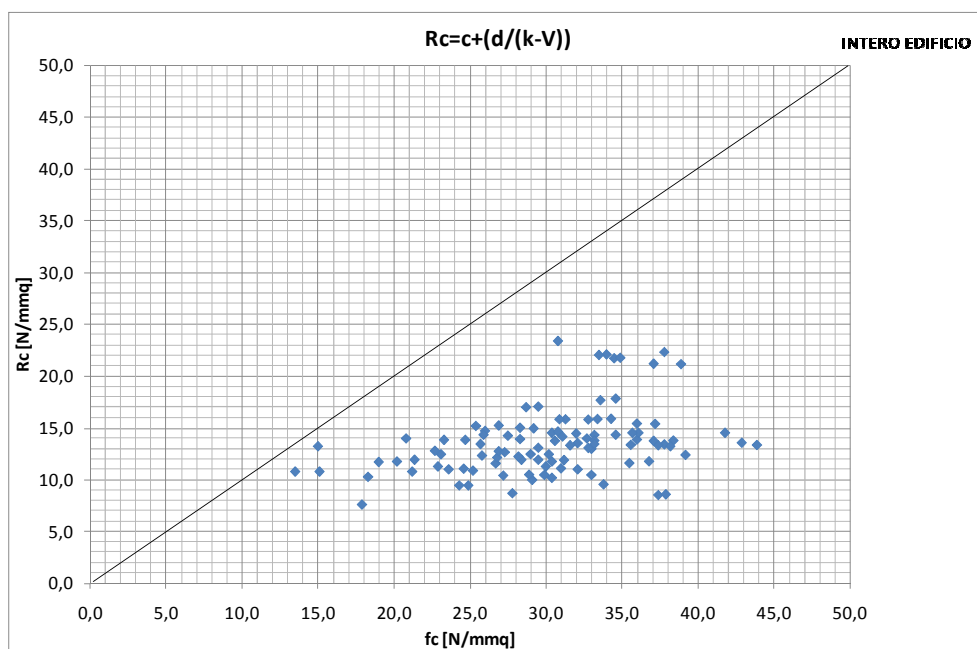


Figura 38: Grafico relativo alla formula di correlazione $Rc=c+(d/(k-V))$

Mentre la formula di Giannini in genere sovrastima la resistenza. Cio è evidente soprattutto per le microcarote. La deviazione standard varia dal 28% dei provini con diametro 100 mm al 32% di quelli con diametro 32 mm (tabella 16 e 23).

Analogo discorso può essere ripetuto per la formula di Hisham, e Y. Qasrawi, dove in modo evidente si nota che la resistenza calcolata, riferendosi solo alla velocità ultrasonora, è notevolmente superiore a quella reale soprattutto con le microcarote. In quest'ultimo caso la deviazione standard raggiunge il valore eccessivo del 77% (tabella n° 23).

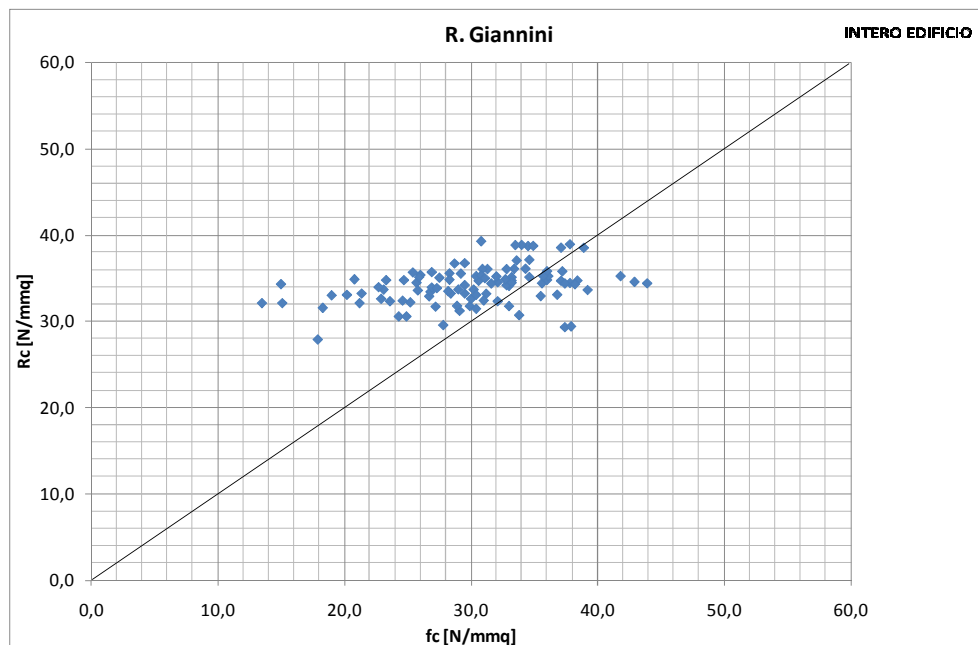


Figura 39: Grafico relativo alla formula di correlazione di Giannini

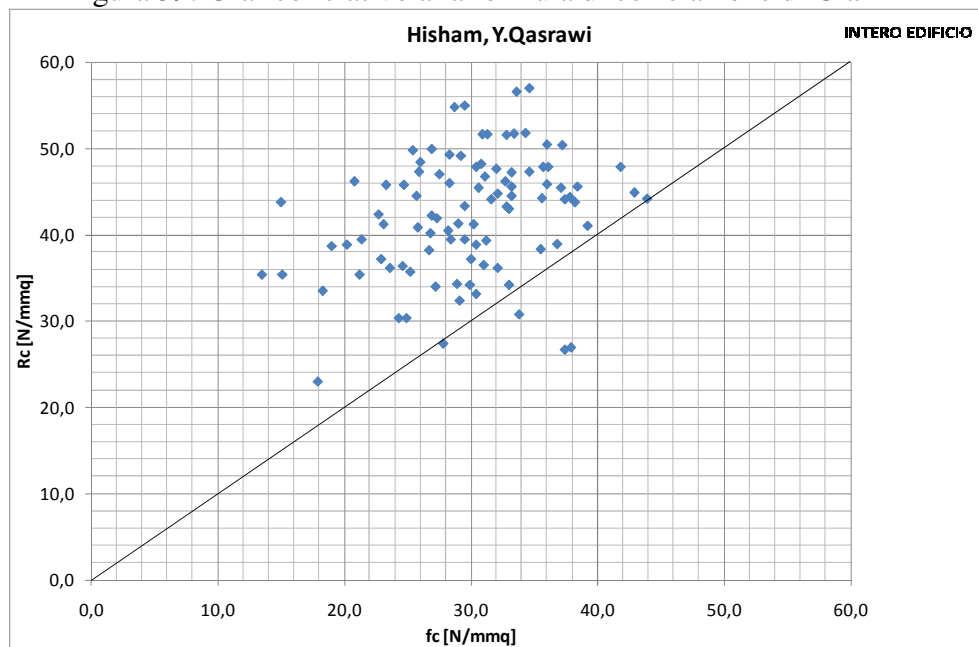


Figura 40: Grafico relativo alla formula di correlazione Hisham - Qasrawi

4.5 Prove combinate sclerometro-ultrasuoni (metodo Sonreb)

La combinazione delle indagini ultrasonora e sclerometrica danno vita alla metodologia SonReb. Tale metodologia dovrebbe consentire di ottenere risultati più attendibili sulla stima della resistenza a compressione del calcestruzzo.

I vantaggi di tale metodologia sono i seguenti:

- annullamento dell'influenza dell'umidità e del grado di maturazione del calcestruzzo sui risultati dell'analisi poiché gli effetti sulla misura di velocità di propagazione e sull'indice di rimbalzo sono uguali e di segno opposto e pertanto si annullano;
- riduzione rispetto all'indagine ultrasonora, dell'influenza della granulometria dell'inerte, del dosaggio e del tipo di cemento e degli eventuali additivi utilizzati;
- diminuzione, rispetto all'indagine sclerometrica, dell'importanza delle variazioni di qualità tra starti superficiali e strati profondi del calcestruzzo.

La metodologia SonReb si applica determinando per ogni area di calcestruzzo saggiata le seguenti coppie di valori: velocità di propagazione dell'onda ultrasonora (V) e di indice di rimbalzo dello sclerometro (IR_m).

Per la stima della resistenza si utilizzano degli abachi come quello riportato nella figura successiva in cui per ogni coppia di V ed IR_m si intercetta una curva rappresentativa della resistenza a compressione del calcestruzzo.

Le prove in questione – di tipo in situ e non distruttive – nate dalla combinazione dei due metodi di indagine già descritti, sono finalizzate ad accertare le caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi costituenti le strutture esaminate, nonché forniscono preziose informazioni sull'eventuale presenza di difetti strutturali, disomogeneità dell'impasto originario, ecc.

Detta correlazione è molto importante poiché permette di correlare la resistenza meccanica misurata in superficie (prova sclerometrica), con la tessitura strutturale in profondità (trasmissione ultrasuoni), coinvolgendo in definitiva l'intero corpo della struttura indagata.

Esse vengono condotte applicando lo sclerometro (tipo Schmidt, ecc ...) in 9 battute successive sulle facce dei manufatti indagati nella zona centrale di

applicazione della sonda sorgente; detta zona deve essere corrispondente al punto intermedio di tre misurazioni ultrasoniche effettuate linearmente sulla faccia medesima.

La necessità di tre misurazioni discende dall'esigenza di depurare i risultati ottenuti da eventuali errori locali; i parametri di trasmissione valutati vengono ottenuti mediando i risultati delle tre misurazioni ultrasoniche.

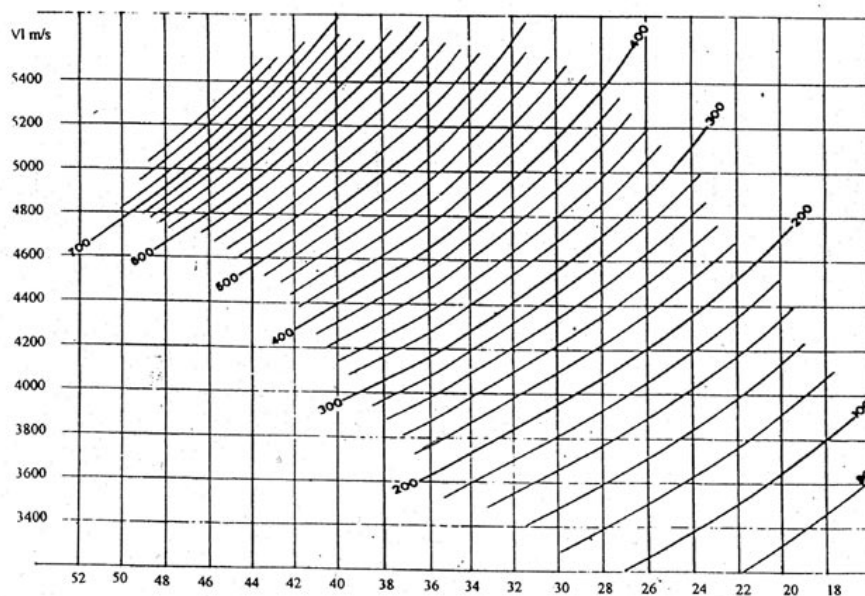


Figura 41: Abaco generico - Metodo SonReb

4.6 Valutazione della resistenza caratteristica del calcestruzzo con metodi combinati (SonReb)

Nell'analisi dei dati sono state impiegate le correlazioni, accreditate dalla letteratura specialistica, quali legami tra i parametri non distruttivi rilevati. La resistenza calcolate con le suddette correlazione è stata confrontata con

la resistenza R a compressione effettiva delle carote prelevate nelle stesse stazioni di prova.

4.6.1 Formula di Correlazione RILEM NDT1

$$R_C \text{ (N/mm}^2\text{)} = 7.695 \times 10^{-11} \times I_m^{1.4} \times V^{2.6} \times K \text{ (in Nmm}^{-2}\text{)} \text{ (V in msec}^{-1}\text{)}$$

dove k è un coefficiente di correzione come di seguito determinato.

Con riferimento alle carote di calcestruzzo estratte, siano rispettivamente IRm e V i valori misurati degli indici sclerometrici (media) e della velocità di transito degli ultrasuoni ed R_{cil} la resistenza de provino cilindrico ottenuta dalla prova di compressione alla pressa.

Si valuta

$$R^* \text{ (N/mm}^2\text{)} = 7.695 \times 10^{-11} \times I_m^{1.4} \times V^{2.6} \text{ (in Nmm}^{-2}\text{)}$$

$$R^*_{\text{cub}} \text{ (N/mm}^2\text{)} = k_1 R_{\text{cil}} / 0,83$$

dove K₁ è un coefficiente funzione del rapporto altezza (h) diametro (d) della carota ricavabile dalla tabella 6

	Valori k ₁	
h/d	ASTM-C-4268	B.S. 1881-1970
2	1	1
1,75	0,99	0,98
1,5	0,97	0,96
1,25	0,94	0,94
1	0,91	0,92

Tabella 6: Valori di K₁

Risulta:

$$k_1 = R_{\text{cub}}^* / R^*$$

Con la formula della RILEM i valori calcolati sono comunque variabili. Non si apprezza una compensazione degli effetti tipica dei metodi combinati che faceva presupporre una minore variazione delle resistenze calcolate. Anche in questo caso la deviazione standard varia dal 25% delle carte Ø 100 mm al 35 % di quelle con Ø 32 mm sia nei vari piani che nell'intero edificio.

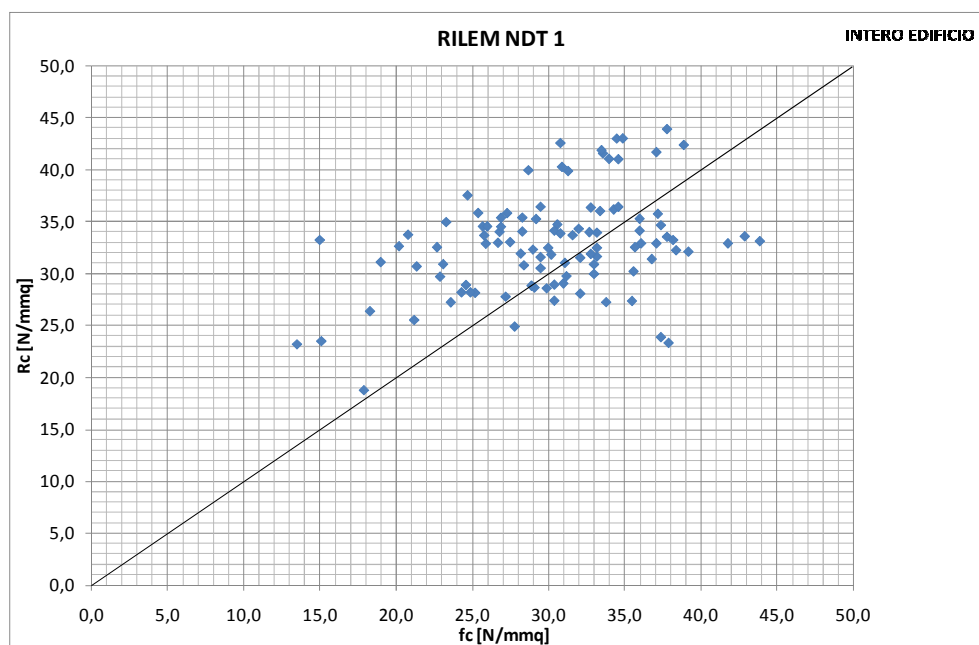


Figura 42: Grafico relativo alla formula di correlazione RILEM NDT1

4.6.2 Formula di Correlazione (Di Leo, Pascale)

Si indichi con *c* il cosiddetto *coefficiente globale di influenza*, e con *n* il numero di carote estratto. Con riferimento a ciascuna carota, si calcola

$$R_{\text{cub}}^* = \frac{2,5}{1,5 + \frac{d}{h}} R_{\text{cil}}$$

$$\underline{R}^* = 1,2 \times 10^{-9} (IR_m)^{1,058} x (V)^{2,446} \quad (\text{in } Nmm^{-2})$$

E si compila la seguente tabella:

CAROTA	h (mm)	D (mm)	V* (msec ⁻¹)	IR _m * (Nmm ⁻²)	R _{cil} (Nmm ⁻²)	R _{cub} * (Nmm ⁻²)	<u>R</u> * (Nmm ⁻²)	$\frac{R_{cil}}{R^*}$ (Nmm ⁻²)
							$\sum_1^n i$	$\frac{R_{cil}}{R^*}$

Dopo di che risulta:

$$c = \frac{\sum_1^n \frac{R_{cub}}{R^*}}{n}$$

Per la stima della classe di resistenza in situ del calcestruzzo per ogni elemento costruttivo tipo logicamente omogeneo si calcola:

$$\underline{R} = 1,2 \times 10^{-9} (IR_m)^{1,058} x (V)^{2,446} \quad (\text{in } Nmm^{-2})$$

Utilizzando i valori (IR_m) e V (in msec⁻¹) ricavati sperimentalmente dalle varie stazioni di misura quindi

$$R = c \underline{R}$$

Riguardanti i valori così ottenuti come resistenza di prelievo, se sono N gli elementi costruttivi tipologicamente omogenei si calcola:

il valor medio:

$$R_m = \frac{\sum_1^N i R_i}{N}$$

- lo scarto quadratico medio

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_1^N (R_m - R_i)^2}{N-1}}$$

- il coefficiente di variazione

$$c_v = \frac{\delta}{R_m} \times 100$$

compilando per ogni elemento costruttivo tipologicamente omogeneo tabelle analoghe alle

Posizione		Pilastrini					$\delta =$ $c_v =$
PIANO	N°	IR_m	V (msec ⁻¹)	\underline{R} (Nmm ⁻²)	R (Nmm ⁻²)	$R_m - \underline{R}$ (Nmm ⁻²)	
$R_m = \sum_{i=1}^N i R_i$							

Posizione		Travi di piano					$\delta =$ $c_v =$
PIANO	N°	IR_m	V (msec ⁻¹)	\underline{R} (Nmm ⁻²)	R (Nmm ⁻²)	$R_m - \underline{R}$ (Nmm ⁻²)	
$R_m = \sum_{i=1}^N i R_i$							

Coefficienti di variazione $c_v > 10$ sono indici di un calcestruzzo non omogeneo.

Posizione		Travi di fondazione					$\delta =$ $c_v =$
PIANO	N°	IR_m	V (msec ⁻¹)	\underline{R} (Nmm ⁻²)	R (Nmm ⁻²)	$R_m - \underline{R}$ (Nmm ⁻²)	
$R_m = \sum_{i=1}^N i R_i$							

Tabelle 7: Di Leo Pascale: elementi tipo logicamente omogenei

Identico discorso vale anche per il metodo combinato di Di Leo e Pascale. Anzi i valori calcolati sono quasi sempre sovrastimati in entrambi i provini

oggetti di misurazioni. La deviazione standard calcolata è del 33% nel caso di carote standard e del 46% per le micro carote.

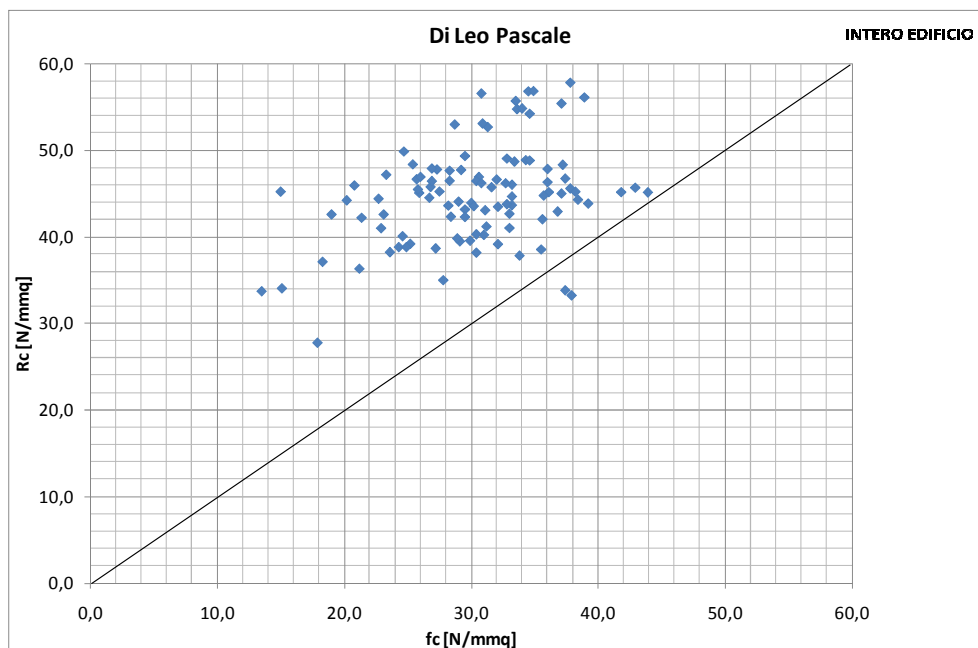


Figura 43: Grafico relativo alla formula di correlazione Di Leo Pascale

4.6.3 Formula di Correlazione (Y. Tanigawa- K. Baba – H. Mori)

$$R=0,9 \times IR_m + 22V - 94 \text{ (in } Nmm^{-2}\text{)}$$

Non si apprezzano risultati migliori rispetto alle formule precedentemente analizzate.

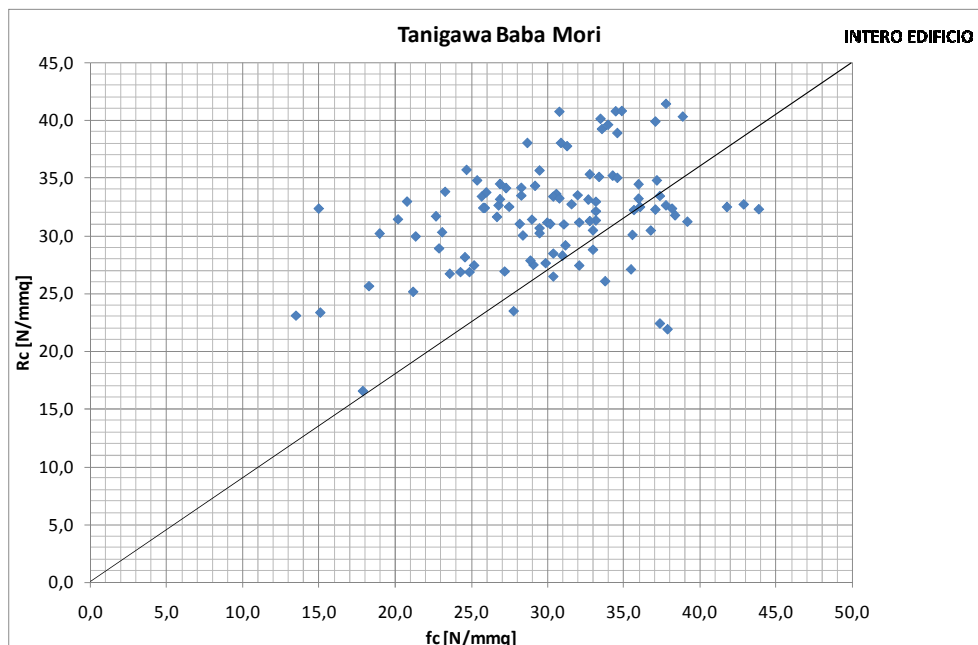


Figura 44: Grafico relativo alla formula di correlazione di Tanigawa Baba Mori

4.7 Distribuzione delle resistenze f_c delle carote prelevate

In laboratorio alla fine delle prove non distruttive sulle carote, queste sono state sottoposte alla prova di schiacciamento monoassiale per ricavare il valore della resistenza a compressione cilindrica. Si è pensato di eseguire un diagramma per verificare che il valore più frequente delle resistenze corrisponde al valore di progetto del calcestruzzo.

4.7.1 Modellazione delle incertezze sulla resistenza del materiale

Quando si eseguano N prove di rottura di provini, uguali fra di loro; per ogni prova si determina il valore R_i corrispondente alla resistenza del generico provino i -esimo. Si calcolino quindi le frequenze relative n_i/N come rapporto fra il numero n_i delle volte in cui si ottiene R_i compreso

nell'intervallo- $\Delta R/2 \leq R \leq + \Delta R/2$ e si disegna quindi l'istogramma delle frequenze relative.

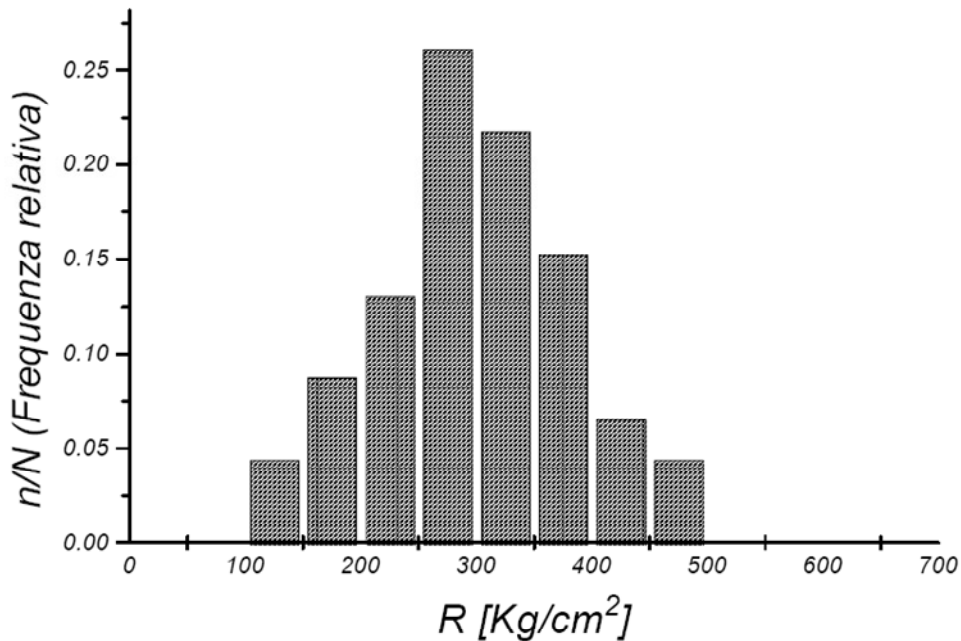


Tabella 8: Istogramma delle frequenze relative

Come si può notare i valori più elevati delle frequenze relative si presentano nella parte centrale del diagramma, quelli più bassi alle estremità.

Il corrispondente modello di previsione considera R come una variabile aleatoria.

Con linguaggio non del tutto rigoroso dal punto di vista matematico possiamo definire una variabile aleatoria come un insieme probabilizzato di numeri.

Dello studio dei modelli probabilistici di previsione si occupa la Probabilità. Una variabile aleatoria X è caratterizzata dalla sua funzione densità di probabilità f(x), definita come:

$$f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}(x \leq X < x+h)}{h}$$

in modo che sia:

$$\text{Prob}(X < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

L'area complessiva sottesa dalla $f(x)$ è pari ad uno, in quanto che la probabilità che si verifichi un evento certo, e cioè che X sia minore di infinito, è pari ad 1.

Un tipo notevole di distribuzione di probabilità è quella Normale o Gaussiana, che è caratterizzata dalla espressione seguente della densità di probabilità (vedi figura seguente)

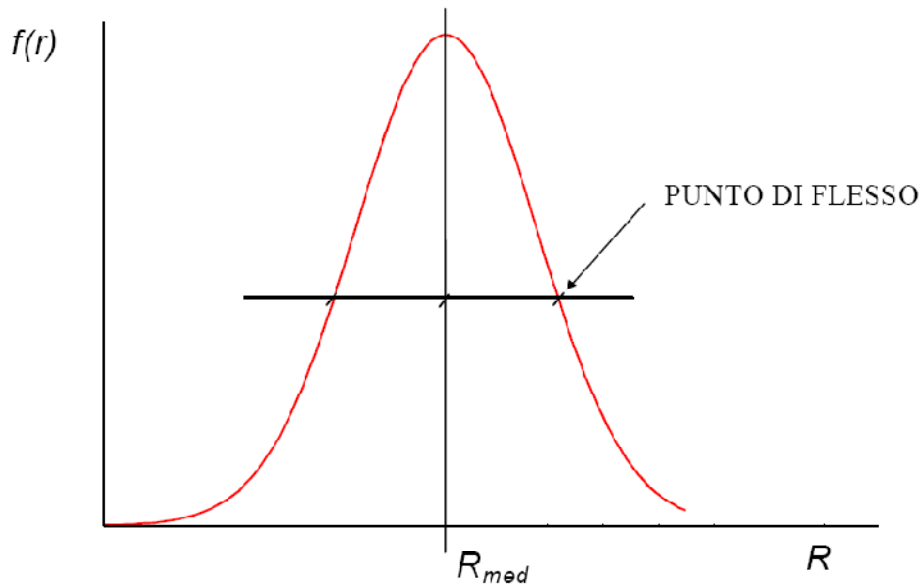


Figura 45: Curva gaussiana

$$N_{m,\sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}$$

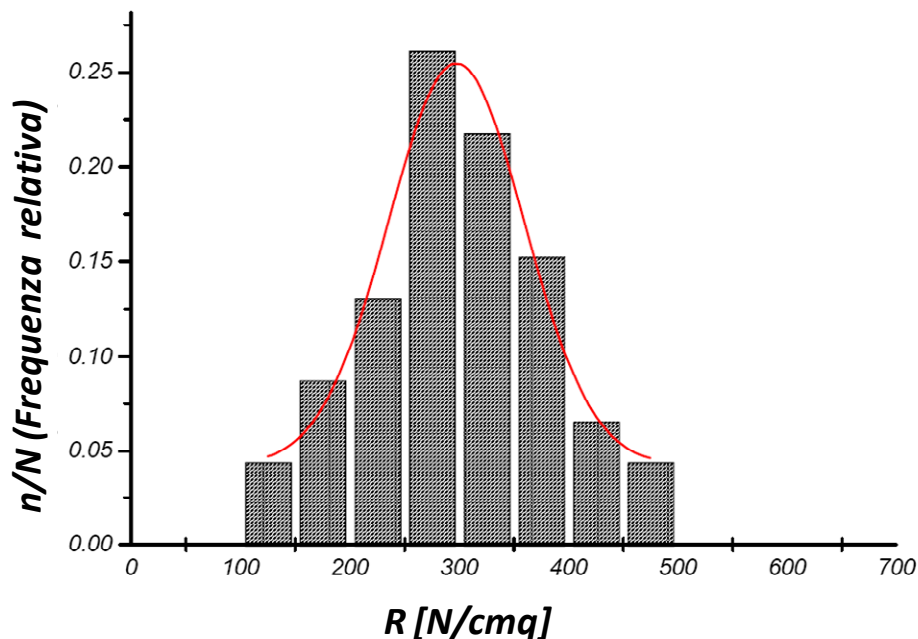
Tra le proprietà della distribuzione Gaussiana, si osserva che essa è simmetrica intorno al valore medio di X , $m = X_{med} = E[X]$ e che quindi valgono le:

$$\text{Prob}(X \leq X_{med}) = 0.5$$

$$\text{Prob}(X > X_{med}) = 0.5$$

Essa presenta due punti di flesso, posizionati a sinistra e a destra del valore medio, da cui distano uno scarto standard σ .

Tale tipo di distribuzione ben si adatta, per il suo andamento, a modellare i risultati della prova sperimentale, come si può vedere osservando la figura seguente.



Nel momento di formulare previsioni, si può quindi considerare la resistenza R del calcestruzzo come una variabile aleatoria, gaussiana.

La probabilità che la resistenza R sia minore del valore prefissato r può essere così calcolata come:

$$\text{Prob}(R < r) = \int_{-\infty}^r f(r) dr$$

in cui

$$f(r) = N_{m,\sigma}(x)$$

Si perviene così in modo molto semplice alla definizione di resistenza caratteristica R_{ck} del calcestruzzo, che è il frattile 5% della popolazione statistica delle resistenze, come:

$$\text{Prob}(R < R_{ck}) = 0.05$$

4.7.2 Distribuzione f_c delle carote Ø 100 mm

Per quanto detto sopra nel caso delle carote di diametro 100 mm e altezza maggiore del doppio del diametro si ha la seguente tabella:

Intervallo di resistenza f_c	Numero provini nell'intervallo	n_i / numero totale di provini
$-2 \leq f_c \leq +2$	n_i	n_i/N
10	0	0,00
14	1	0,01
18	2	0,01
22	6	0,04
26	25	0,15
30	44	0,27
34	45	0,28
38	28	0,17
42	9	0,06
46	2	0,01

Tabella 9: Distribuzione delle resistenze per carote \varnothing 100 mm.

L'istogramma che si ottiene è il seguente:

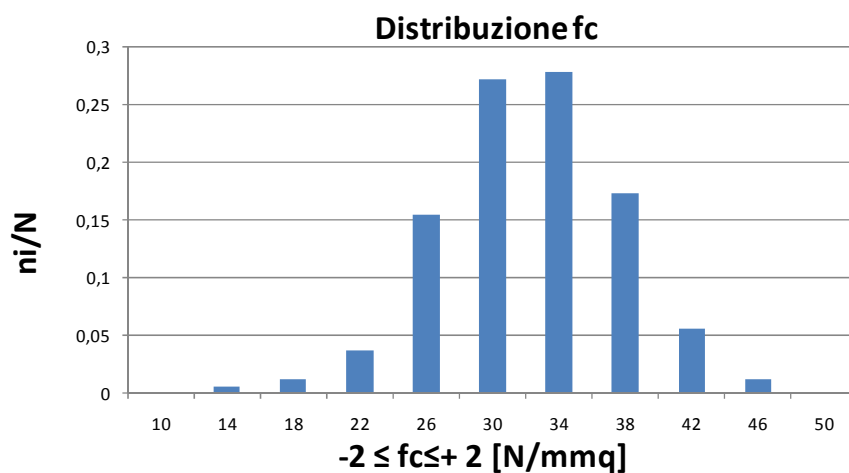


Figura 46: Istogramma della distribuzione di resistenza a compressione delle carote da \varnothing 100 mm

La distribuzione è di tipo gaussiana La resistenza cilindrica a compressione si concentra intorno al valore 30 e 34 N/mm². Si ricorda che nelle schede tecniche presentata al Genio Civile i progettisti della struttura avevano eseguito i calcoli, pensando di utilizzare un calcestruzzo con R_{ck} di 350 N/mm².

4.7.3 Distribuzione f_c microcarote diametro 32 mm

Nel caso delle microcarote di diametro Ø 32 mm il rapporto altezza diametro ha valore circa . Pertanto con riferimento alla tabella n°6, la resistenza cilindrica a compressione deve essere moltiplicata per un coefficiente di riduzione K₁=0,91.

Intervallo di resistenza f _c	Numero provini nell'intervallo	n _i / numero totale di provini
-2 ≤ f _c ≤ +2	n _i	n _i /N
10	0	0,00
14	4	0,01
18	9	0,02
22	26	0,05
26	56	0,12
30	115	0,24
34	101	0,21
38	78	0,16
42	58	0,12
46	26	0,05
50	5	0,01
54	3	0,01

Tabella 10: Distribuzione delle resistenze per carote Ø 32 mm.

L'istogramma che si ottiene è riportato in figura 48.

Anche in questo caso si vede che la resistenza a compressione cilindrica si concentra su un valore di 30 e 34 N/mm². Bisogna notare che il se si vuole

ricavare il valore della resistenza a compressione cubica, tenendo conto anche del coefficiente riduttivo K_1 , si ottiene un valore superiore a quello del caso delle carote standard. In altre parole dalle microcarote possiamo ricavare un valore della resistenza superiore a quello effettivo. Questo può essere spiegato dall'eventualità che la sezione resistente del provino è spesso occupata quasi totalmente dall'inerte. Pertanto nella prova di compressione potrebbe capitare che si va a misurare la resistenza dell'inerte.

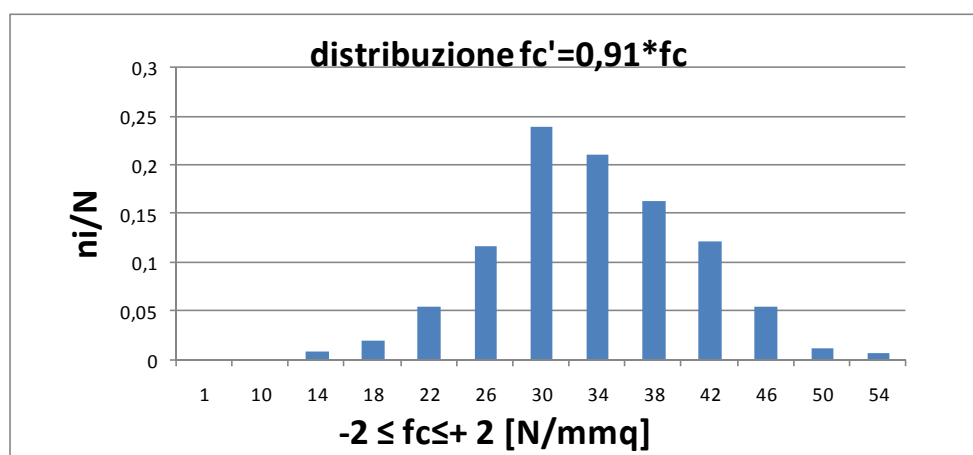


Figura 47: Istogramma della distribuzione di resistenza a compressione delle carote da Ø 32 mm

4.8 Confronto dei vari metodi utilizzati tra carote e microcarote

Date alcune stazioni di misura dove sono state prelevate sia carote che microcarote, si è pensato di confrontare le varie relazioni utilizzate precedentemente.

Si è analizzata la stazione di misura denominata “W1b”, disposta al piano interrato, sul pilastro W1 avente orientamento b. In questa stazione sono state prelevate una carota standard di diametro 100 mm e, nelle strette vicinanze, due carote di diametro 32 mm. Queste ultime sono state ulteriormente divise in sei carote avente un rapporto altezza diametro pari ad 1. E' stato allora necessario utilizzare il coefficiente di riduzione K_1 della

resistenza cilindrica secondo la tabella n°6 per poter confrontare le resistenze cilindriche tra carote standard e microcarote.

Di seguito sono riportati i grafici relativi a tutte le formule di correlazione, escluso evidentemente quello dipendente solamente all'indice di rimbalzo perché coincide con il diagramma relativo alla stazione di misura dell'indice di rimbalzo.

Il punto del diagramma definito “valor medio delle microcarote” ha come ascissa il valor medio di tutte le resistenze a compressione delle microcarote schiacciate e per ordinata il valor medio di tutte le resistenze calcolate con la formula usata nel diagramma delle sei microcarote.

Si può infine notare che, in questo caso, lo scostamento del “valor medio delle microcarote” dalla carota standard è trascurabile; sono quasi coincidenti.

Di seguito sono riportati i grafici solamente per la stazione W1b.

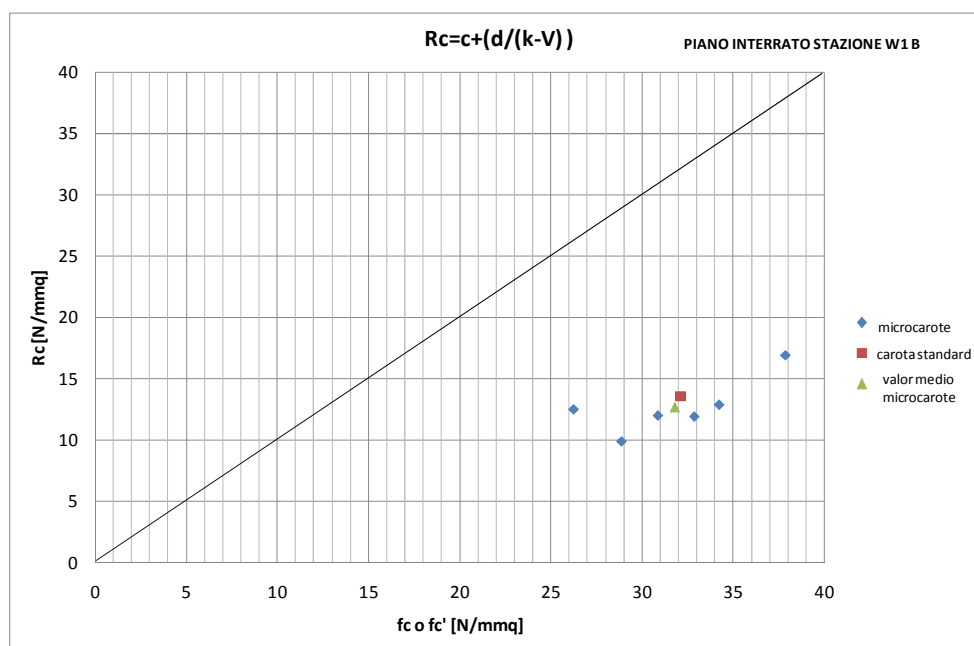


Figura 48: Grafico di confronto carota e microcarota relativo alla singola stazione, $Rc=c+(d/(k-V))$

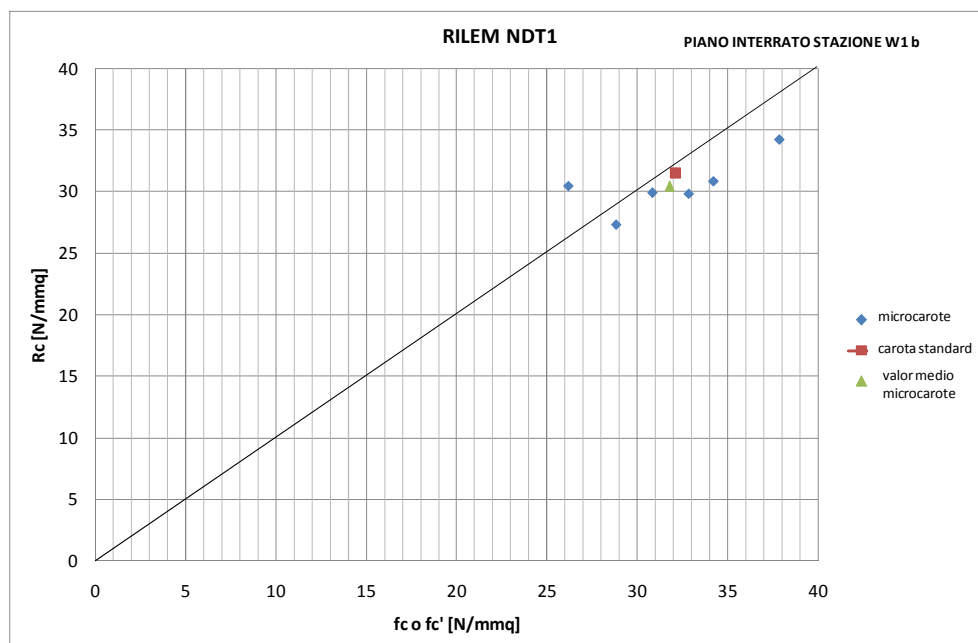


Figura 49: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, RILEM

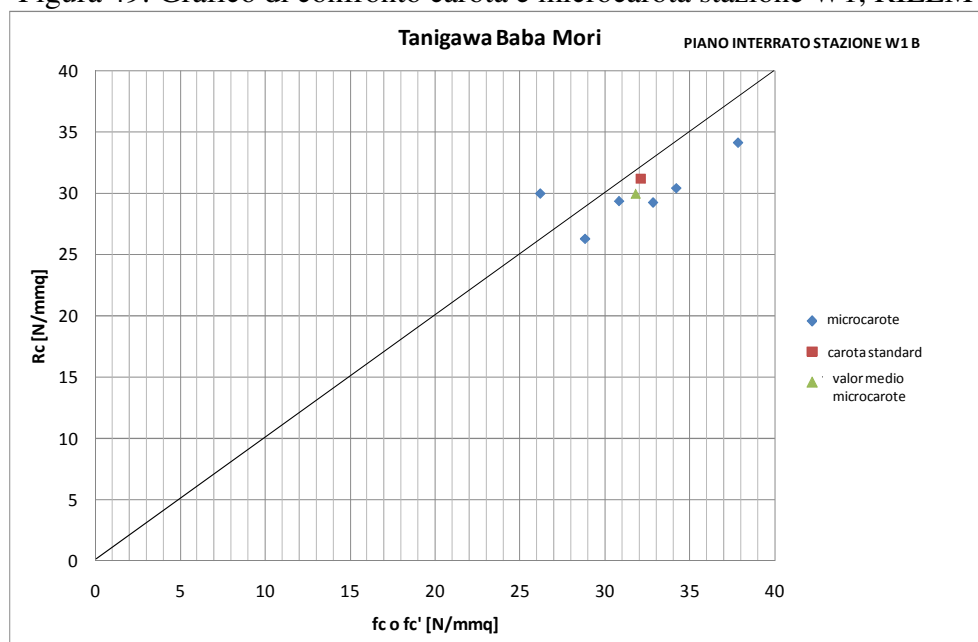


Figura 50: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Tanigawa

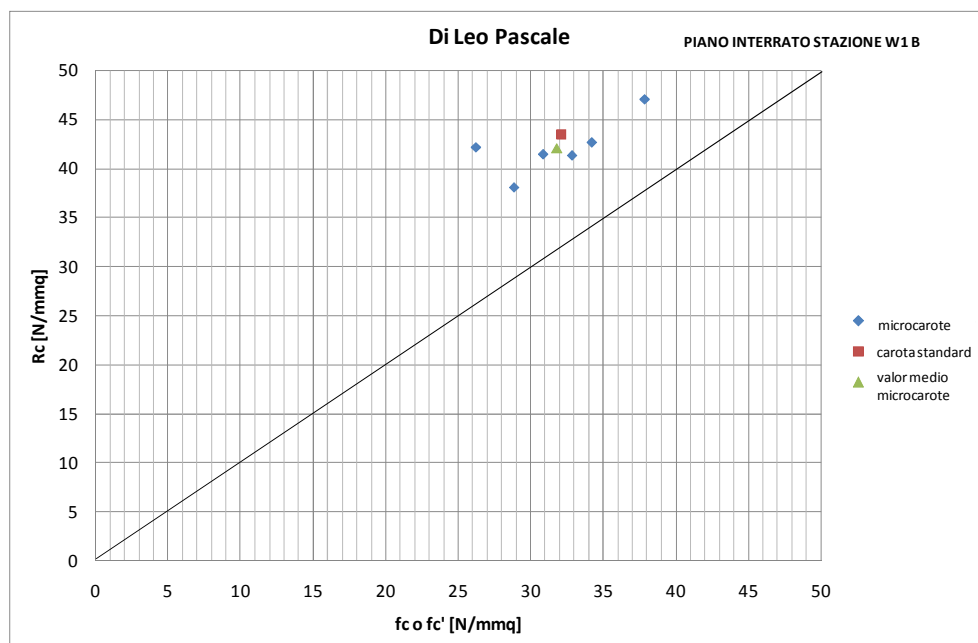


Figura 51: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Di Leo

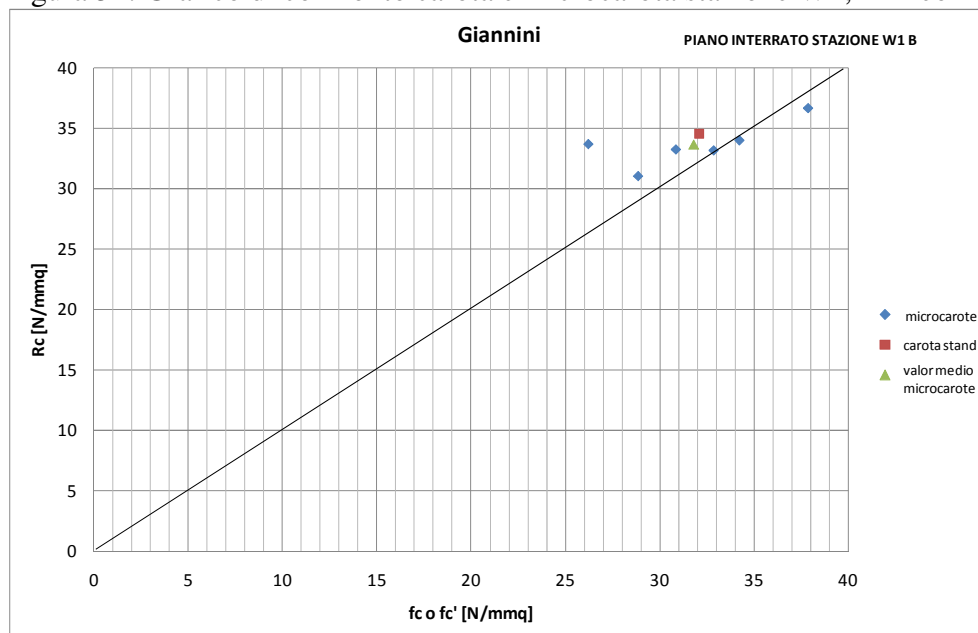


Figura 52: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Giannini

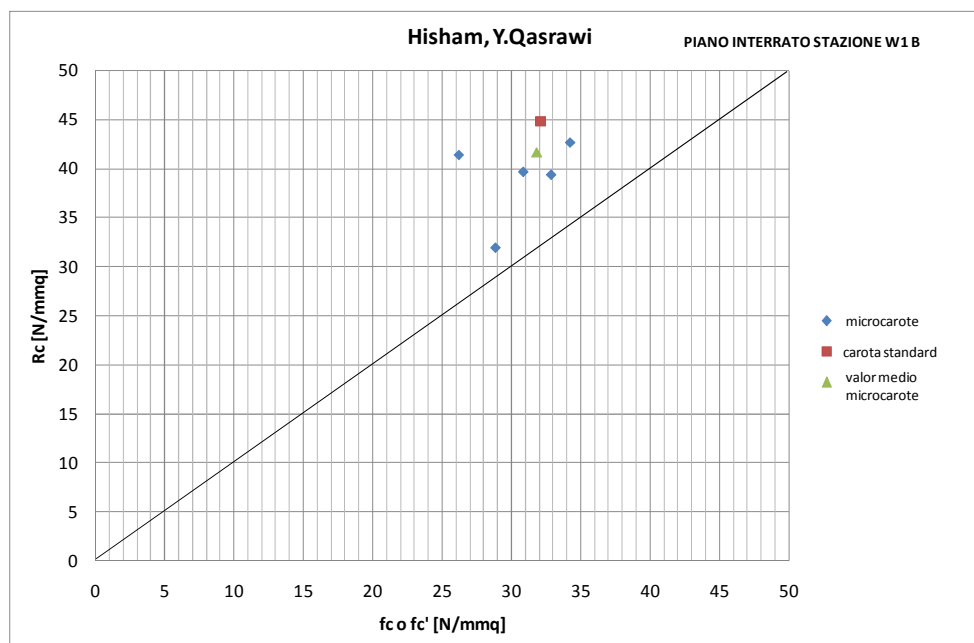


Figura 53: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Hisham

Sempre nel piano interrato sono state selezionate tutte le stazioni di prova dove oltre ad entrambe le indagini non distruttive (sclerometria ed ultrasonora) sono state eseguite le carote e le microcarote. Dato che le microcarote, in laboratorio, sono state suddivise in più carote, avente lo stesso rapporto altezza/diametro pari ad uno, di queste sono stati misurati e calcolati, rispettivamente, il valor medio della resistenza a compressione cilindrica e il valor medio della resistenza calcolata con la formula di correlazione. Pertanto per ogni singola microcarota prelevata in situ si ha il valor medio delle suddette grandezze, ottenuto dalle misurazioni e calcolo sulle microcarote tagliate. Nei grafici è stato riportato per ogni micro carota prelevata in situ il valore medio sia di f_c' che R_c .

Si nota anche in questo caso una dispersione dei risultati. In particolare in varie stazioni di misura è stata prelevata una sola carota standard ma più microcarote. La probabilità di constatare dei difetti nelle microcarote, con conseguente variazione della resistenza a compressione, è maggiore del caso delle carote di diametro 100 mm

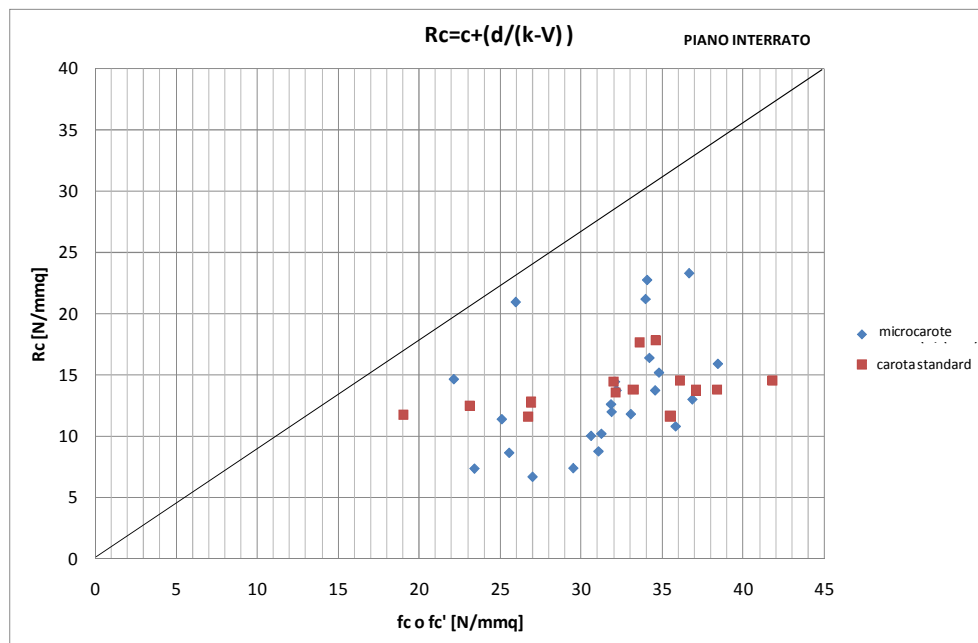


Figura 54: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., vel. UT

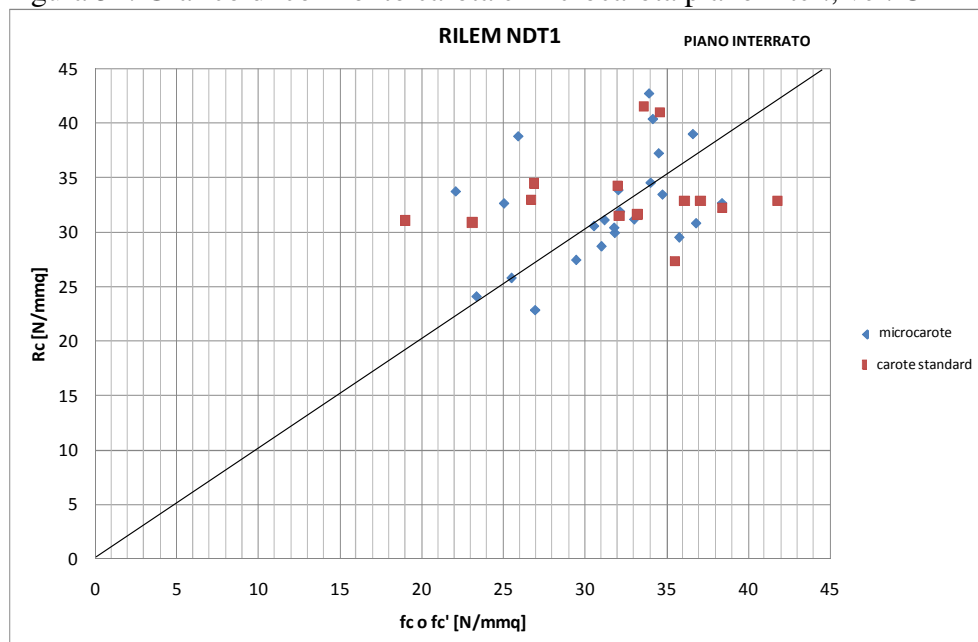


Figura 55: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., RILEM

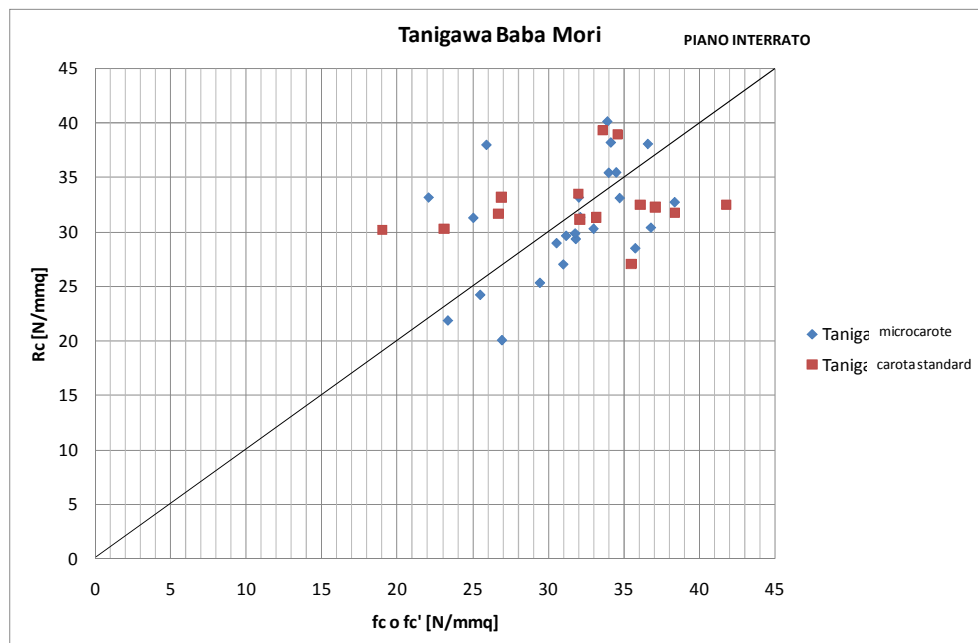


Figura 56: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Tanigawa

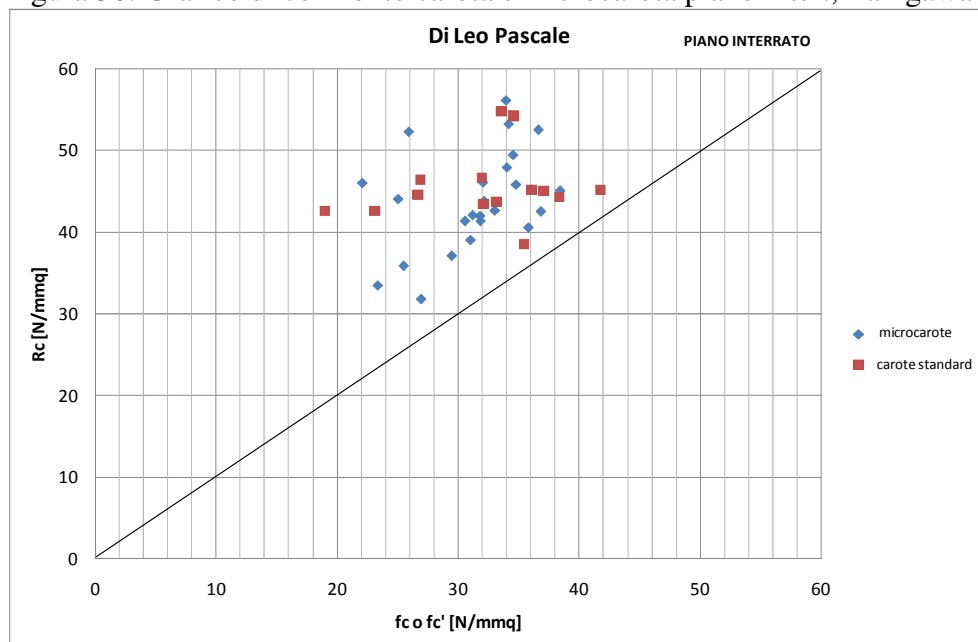


Figura 57: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Di Leo

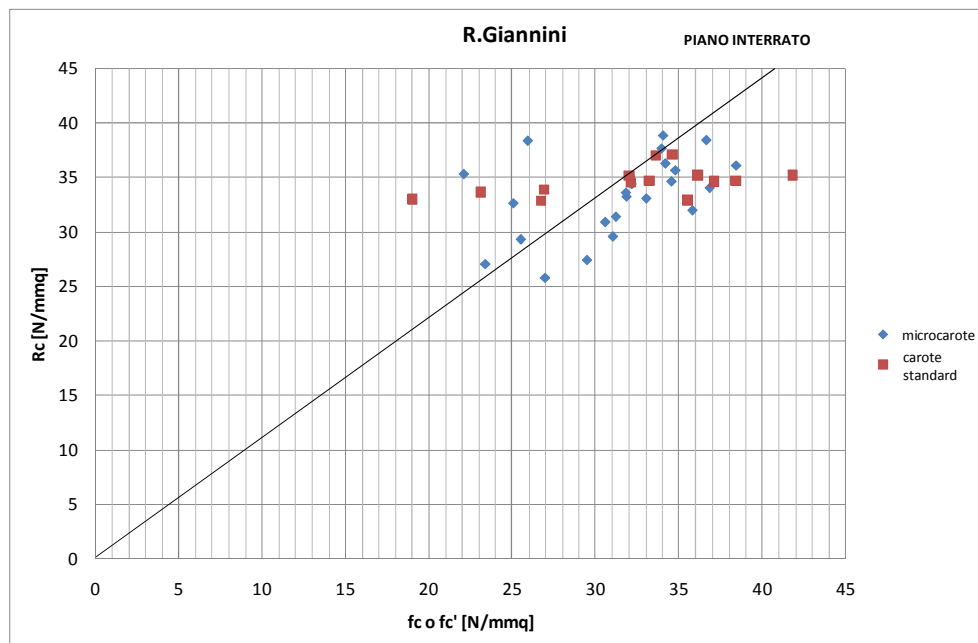


Figura 58: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Giannini

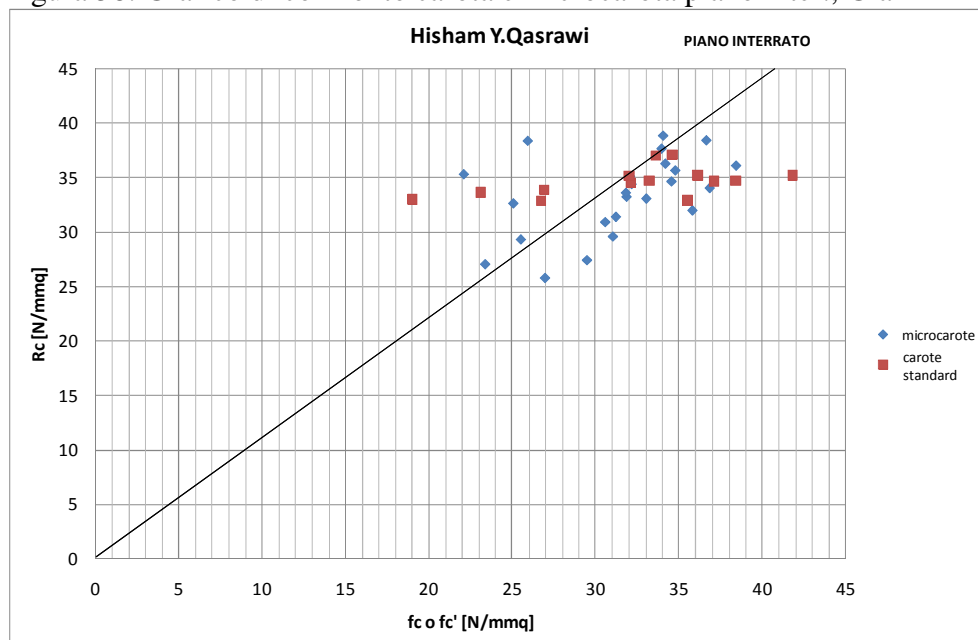


Figura 59: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Hisham

Conclusioni

Sull'edificio B del complesso edilizio in località "Punta Perotti" a Bari è stata condotta un'estesa campagna di prove sperimentali, consistita in indagini non distruttive: sclerometriche, ultrasonore, carbonatazione e termografia. Nelle stesse stazioni di prove sono state prelevate delle carote standard di diametro 10 cm e lunghezza superiore o uguale a 20 cm e di microcarote di diametro 32 mm.

L'obiettivo era quello di verificare l'attendibilità delle formule di correlazione per il calcolo della resistenza a compressione del calcestruzzo partendo dall'indice di rimbalzo e dalla velocità ultrasonora. L'importanza è legata anche alla nuova normativa riguardante la verifica di sicurezza degli edifici esistenti che introduce la possibilità di ridurre fino al 50% il prelievo di carote dagli elementi strutturali per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo, purché sia effettuata una accurata indagine di controlli non distruttivi. Ridurre il più possibile il prelievo di carote ha due conseguenze: minor danneggiamento della struttura esistente e riduzioni dei costi per la determinazione delle caratteristiche del calcestruzzo messo in opera. E' evidente che per perseguire tale obiettivo era necessario effettuare le indagini non distruttive nel maggior numero di stazioni possibili e negli stessi punti prelevare delle carote da schiacciare in prove di compressione monoassiale in modo tale da confrontare i risultati ottenuti. Solamente su una struttura in fase di demolizione era possibile eseguire 181 carote standard e 293 microcarote. Inoltre bisogna sottolineare che nella predetta struttura non erano ancora state realizzate le pareti divisorie, pertanto i pilastri erano facilmente accessibili. Certamente una situazione simile non è possibile trovare su un edificio esistente evidentemente già completamente costruito in ogni sua componente, in quanto per poter giungere sulla superficie degli elementi strutturali principali è necessario eliminare tutti i rivestimenti con un notevole costo, legato sia all'eliminazione dei predetti, ma anche al successivo eventuale ripristino.

Per motivi legati alla sicurezza del cantiere è stato possibile eseguire tali prove solamente sui pilastri per evitare l'utilizzo di impalcature e scale. Sono state imposte delle limitazioni anche sui piani dove poter operare.

Infatti le indagini si sono concentrate sostanzialmente dal piano interrato al terzo piano, a cui bisogna aggiungere alcuni pilastri al sesto piano. Tutte le attività sono state condotte in concomitanza a quelle della ditta incaricata della demolizione, che ha eseguito carotaggi per l'inserimento dell'esplosivo e tagli con seghe di interi setti di pareti per indebolire il più possibile la struttura, favorendo il collasso dopo l'esplosione.

I dati ricavati in campo sono stati catalogati. Le carote prelevate in situ sono state opportunamente sigillate per non consentire che la carbonatazione progredisse lungo tutto l'elemento prelevato.

In laboratorio le carote sono state tutte misurate e pesate. E' stata eseguita su tutti i provini la prova di carbonatazione. La profondità di carbonatazione del calcestruzzo in circa 10 anni di esposizione alle intemperie era superiore a 3 cm. Questo è un aspetto particolarmente importante ai fini della valutazione dell'indice di rimbalzo in quanto la carbonatazione aumenta la durezza superficiale del calcestruzzo. Di fatto con la prova sclerometria si va a misurare proprio la durezza superficiale del calcestruzzo attraverso l'indice di rimbalzo. Se quest'ultimo è utilizzato in una formula di correlazione per il calcolo della resistenza a compressione evidentemente si ottiene un valore superiore a quello reale.

Sono state ripetute le prove ultrasuono utilizzando diversi strumenti di misura e confrontando le misure sullo stesso campione e con la stessa macchina, ma effettuate da operatori diversi. Si è constatato che l'incidenza dell'operatore è anche'essa un ulteriore variabile della misurazione della velocità, legata alla capacità di stringere più o meno le sonde alla superficie dei provini. In tale misura operatori diversi possono misurare una velocità che varia fino a 150 m/sec, su una velocità media di circa 3800 m/sec.

Dai grafici ottenuti si è constatato che la resistenza ricavata solo con la formula che correla la velocità ultrasonora i valori calcolati sono tutti inferiori a quelli reali. Non si può dire la stessa cosa per le formule di Giannini e di Hisham e Y.Qasrawi. La tecnica ultrasonora consente inoltre di avere informazioni all'interno del calcestruzzo perché le onde attraversano tutto il materiale interposto tra la sonda emettitrice e quella ricevente. In altre parole l'indagine sclerometria si limita ad indagare la superficie del calcestruzzo, mentre l'indagine ultrasonora consente una

valutazione della consistenza del materiale all'interno dell'elemento strutturale indagato. I metodi combinati dovrebbero compensare i difetti delle singole indagini, consentendo di calcolare delle resistenze prossime a quelle reali.

Dalle analisi dei risultati è evidente che le relazioni utilizzate per calcolare la resistenza a compressione a partire dall'indice di rimbalzo e dalle velocità ultrasonore non hanno dato i risultati sperati. In genere con tali formule si ha una valutazione della resistenza che varia anche del 30 % nel caso delle carote standard. Mentre per le microcarote la differenza è ancora superiore. Questo potrebbe scoraggiare l'utilizzo di tali metodologie.

In realtà queste tecniche consentono, quantomeno, di valutare l'omogeneità del calcestruzzo. Un operatore che esegue una campagna di prove su un edificio si aspetta che le grandezze fisiche misurate varino di poco tra tutti gli elementi strutturali analizzati. In caso contrario ripete e/o ricorre ad ulteriori indagini dove nota evidenti variazioni delle grandezze. Pertanto consentono anche di valutare eventuali anomalie strutturali.

Bisogna inoltre evidenziare che le formule utilizzate sono di tipo sperimentali, ottenute in alcuni casi da prove di laboratorio su provini opportunamente confezionati e maturati in ambiente controllato. Ma il calcestruzzo per sua natura è un materiale eterogeneo costituito da malta cementizia e inerti. Pertanto la sua resistenza è caratterizzata dai suoi componenti. Mentre si conosce l'influenza del rapporto acqua-cemento sulla resistenza l'aliquota di resistenza dovuta all'inerte dipende proprio dalle caratteristiche di quest'ultimo. Gli inerti utilizzati nelle varie aree geografiche sono diversi per tipologia: possono essere inerti di origine calcarea, vulcanica ecc. Per quanto detto una formula ricavata per una certa tipologia di cls può evidentemente dare dei risultati diversi per altre tipologie.

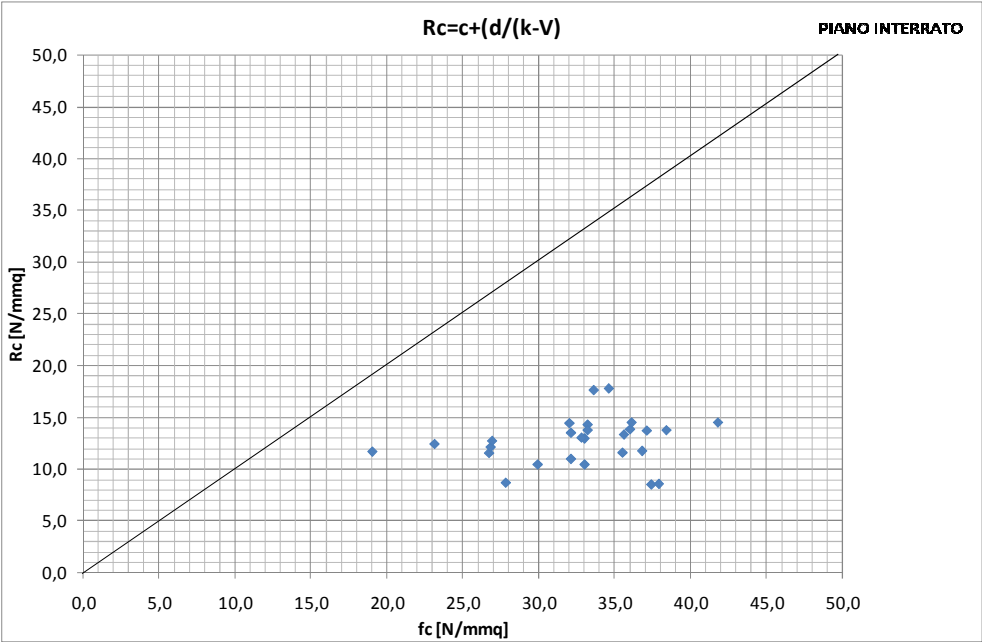
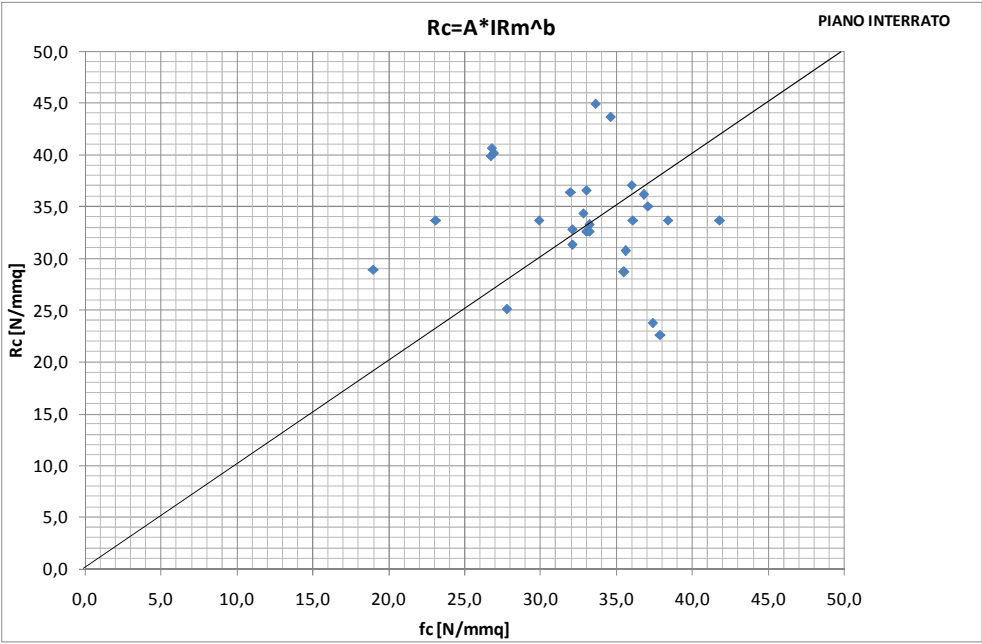
Per i nuovi edifici è auspicabile costruire delle formule di correlazione dai provini di calcestruzzo, che ai sensi della normativa vigente, devono essere comunque realizzati e schiacciati per verificare il materiale fornito sia quello di progetto. Avendo cura di eseguire le indagini sclerometri che e ultrasonore prima della prova di compressione, si potrebbe ricavare una curva che resta nell'eventuale fascicolo del fabbricato e che può essere

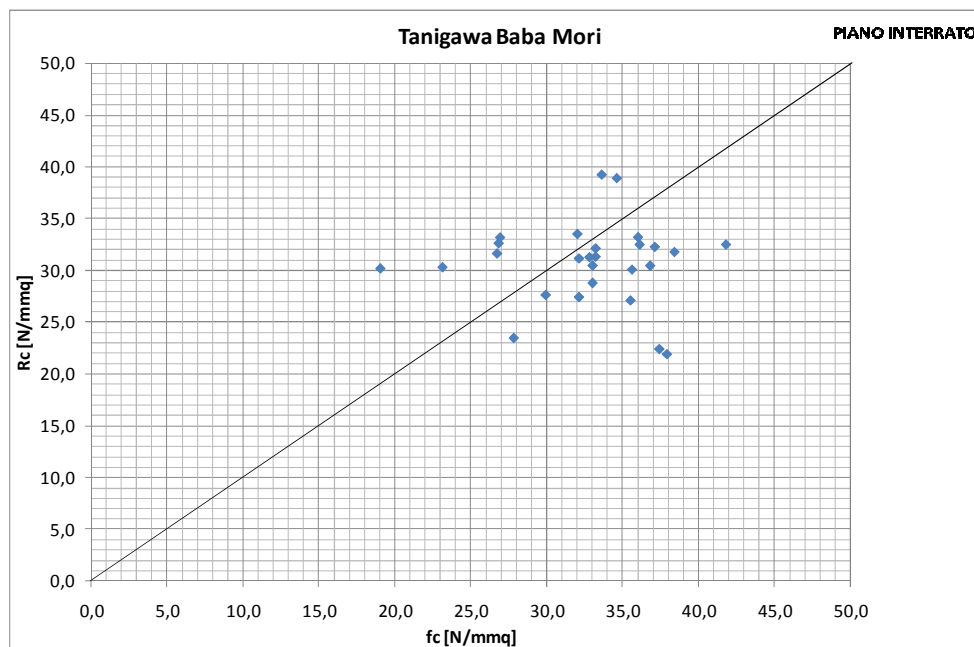
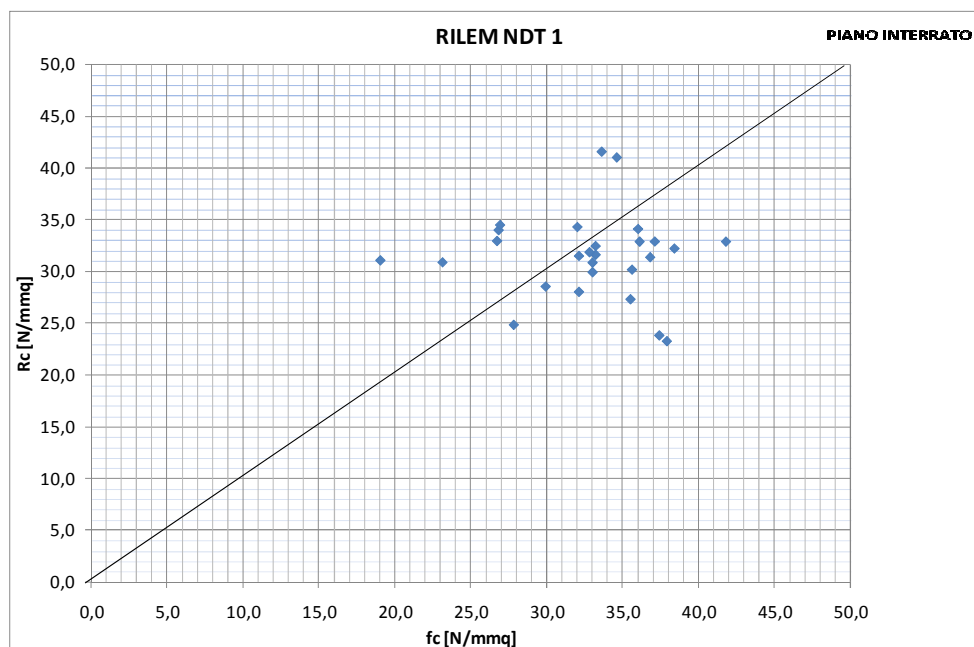
Conclusioni

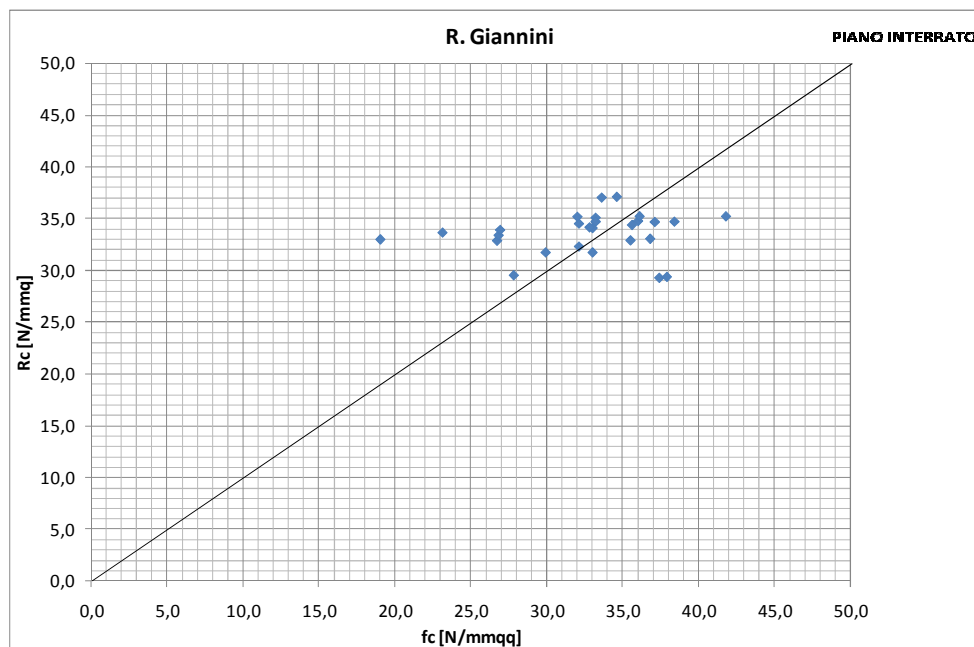
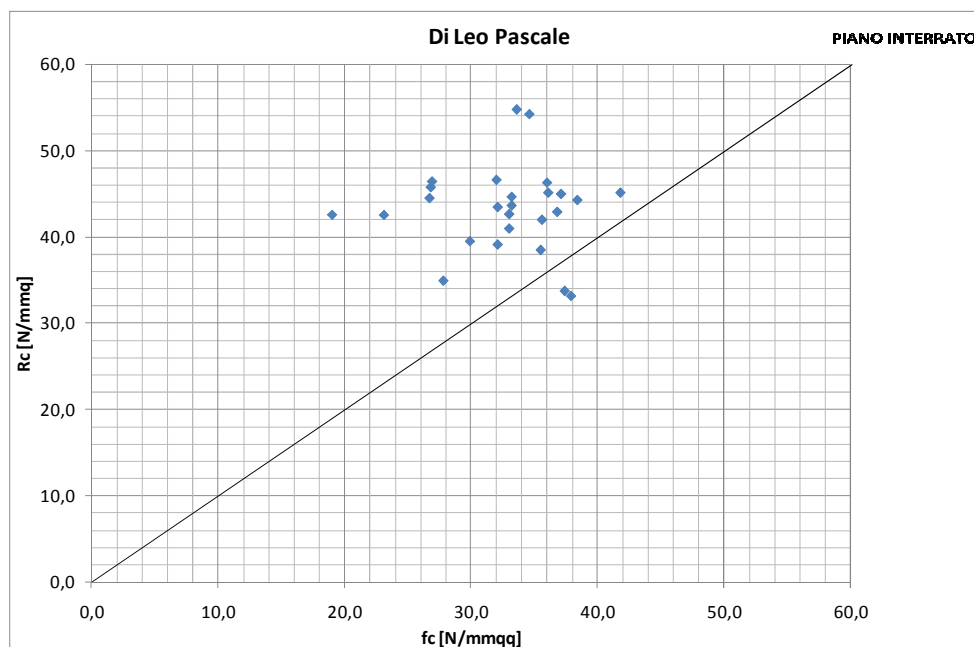
utilizzata dai tecnici incaricati per una valutazione di sicurezza della struttura negli anni.

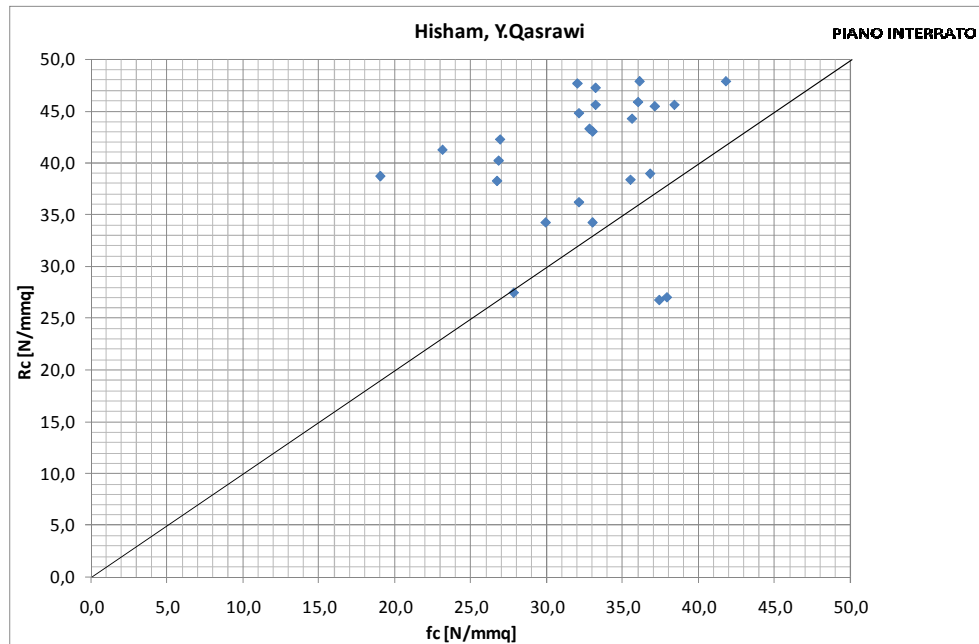
Per la valutazione numerica della resistenza a compressione del calcestruzzo resta indispensabile effettuare il carotaggio, anche se prima di procedere all'esecuzione sarebbe opportuno scegliere una stazione di prelievo caratterizzata da una velocità ultrasonora non molto differente da quella mediamente misurata sugli altri elementi dello stesso edificio.

CAROTE Ø 100 mm





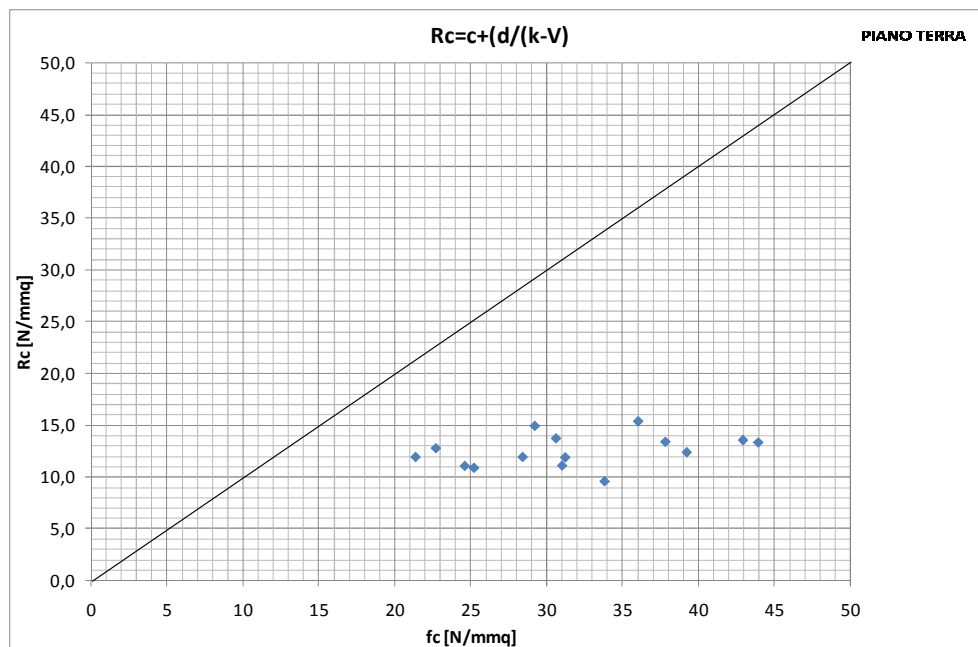
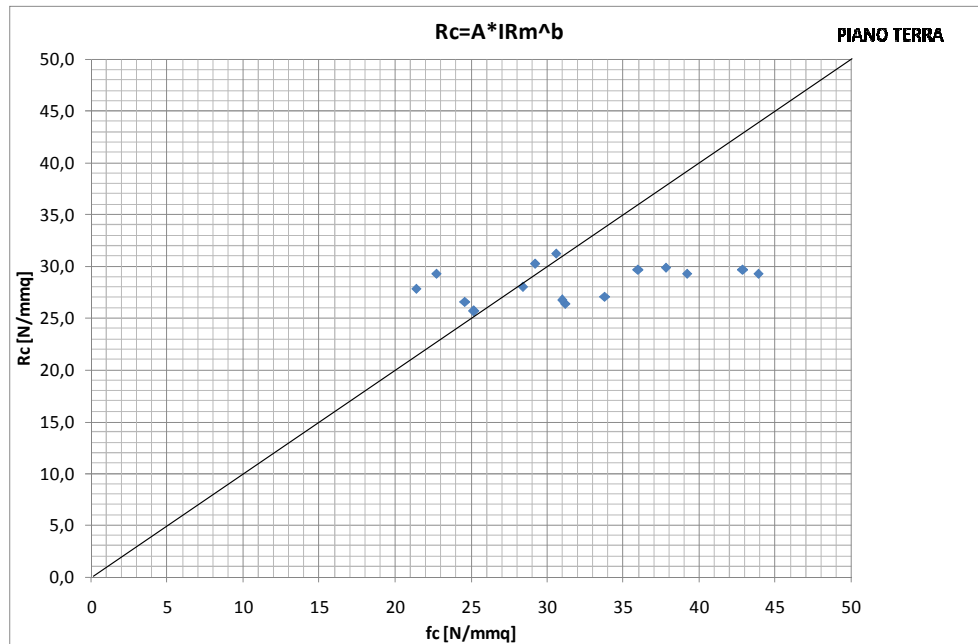


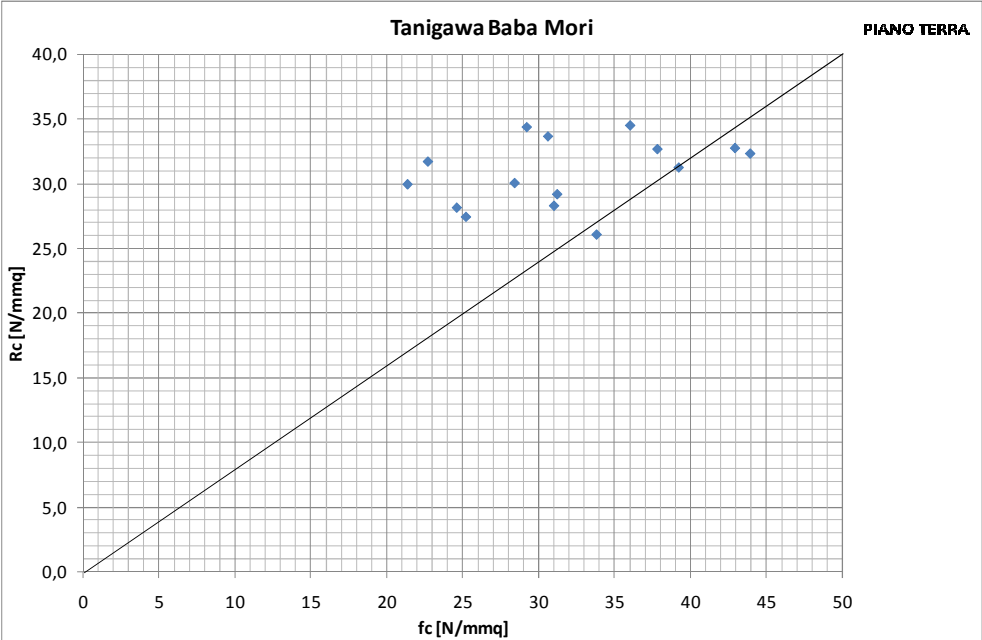
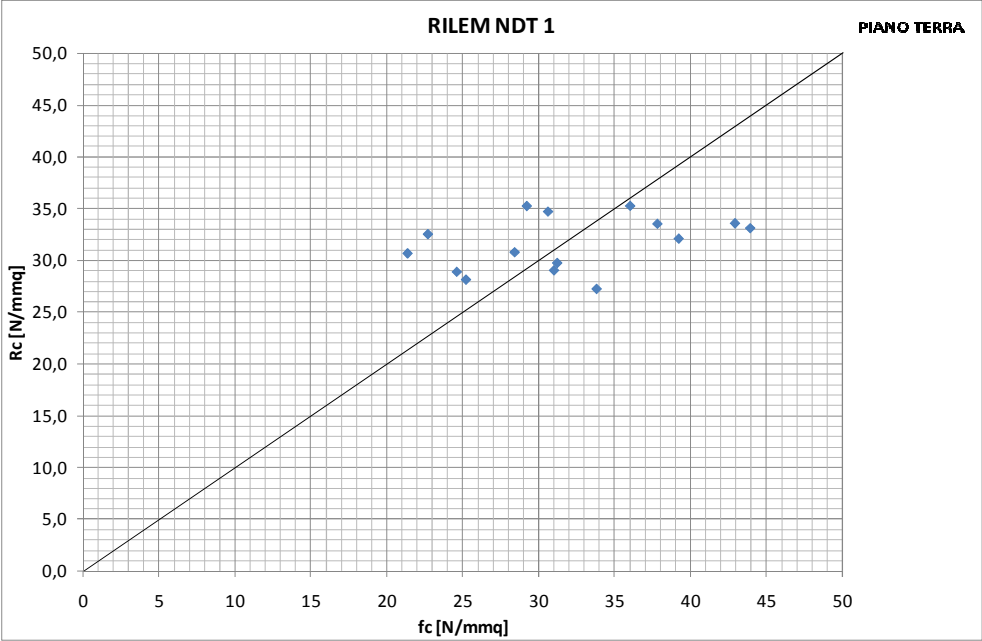


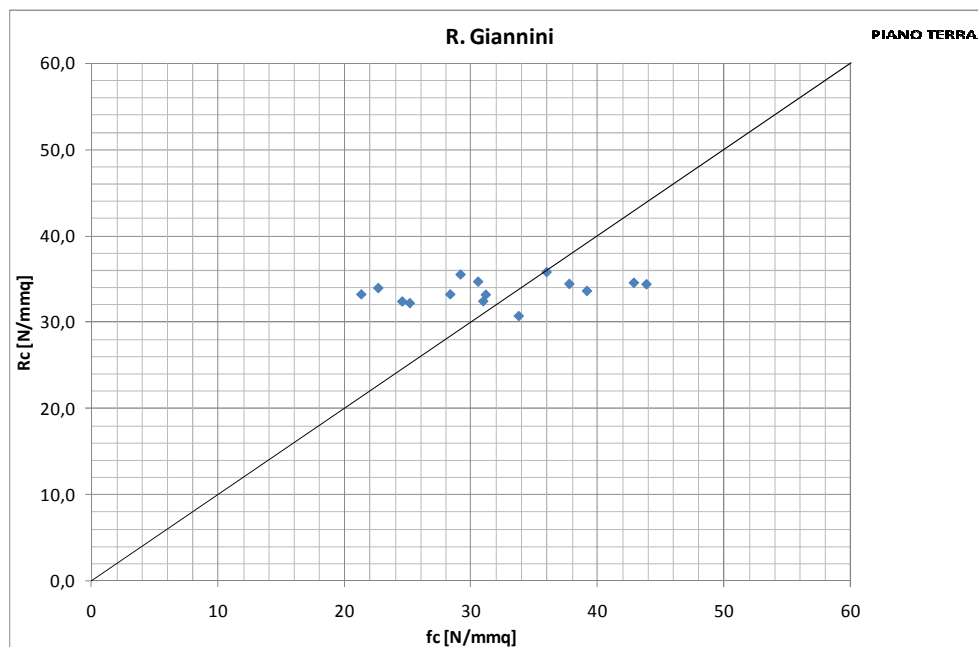
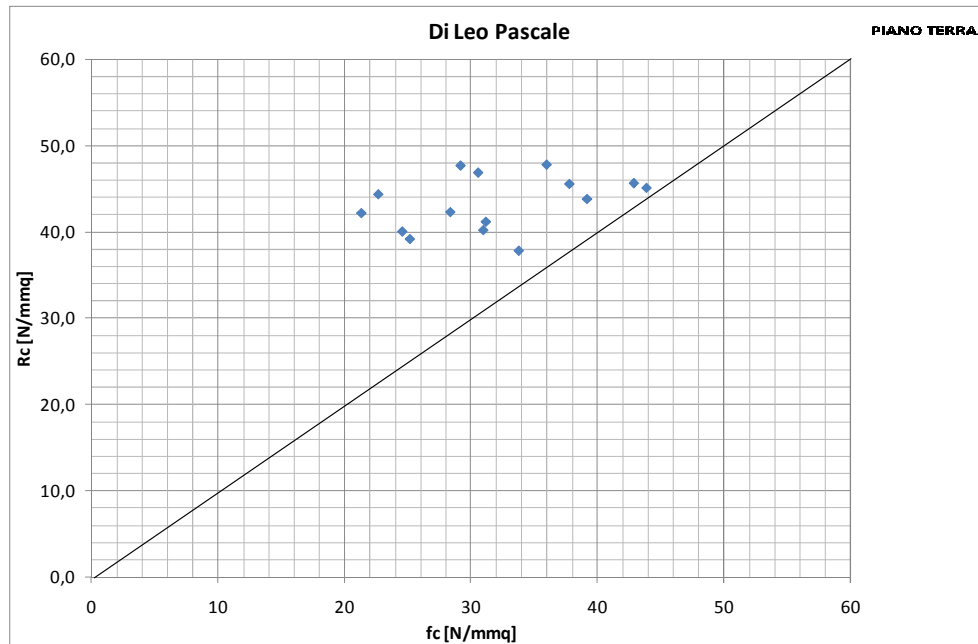
Grafici Carote Ø 100 mm

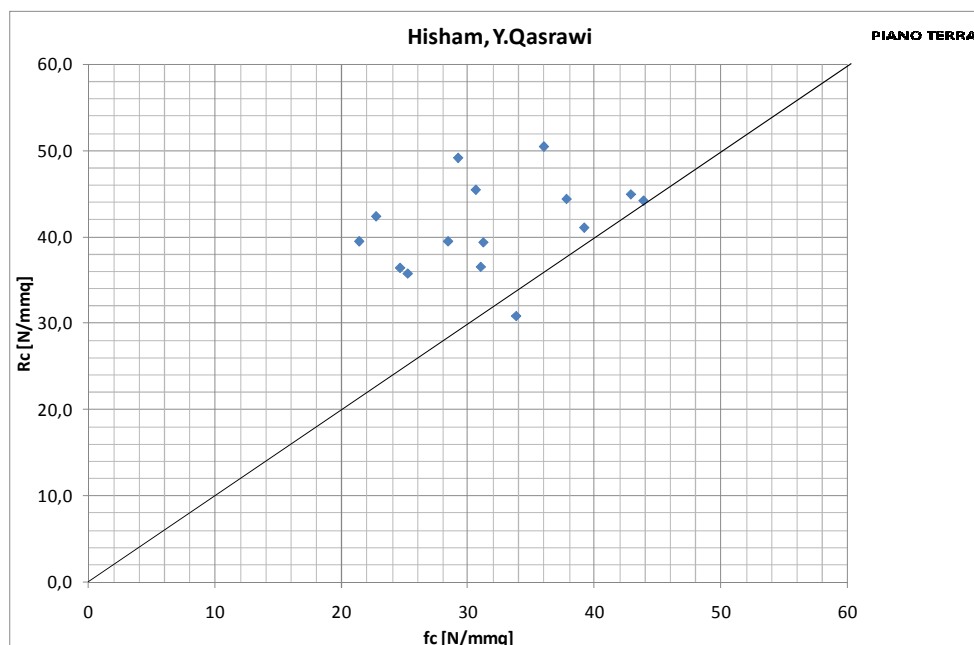
	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y. Qasrawi
	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc
	0,64	0,23	0,64	0,60	0,90	0,78	0,71
	0,90	0,31	0,89	0,84	1,26	1,06	0,99
	0,60	0,23	0,61	0,58	0,88	0,78	0,71
	1,52	0,62	1,63	1,59	2,24	1,74	2,04
	0,99	0,39	0,93	0,92	1,29	1,03	1,30
	1,02	0,42	0,98	0,97	1,35	1,08	1,40
	0,86	0,38	0,85	0,85	1,18	0,97	1,24
	1,00	0,43	0,98	0,97	1,34	1,06	1,42
	0,98	0,42	0,95	0,94	1,31	1,05	1,37
	0,88	0,36	0,84	0,83	1,15	0,90	1,19
	1,03	0,39	0,95	0,92	1,29	0,97	1,27
	1,14	0,45	1,07	1,05	1,46	1,10	1,49
	0,98	0,34	0,87	0,85	1,22	1,01	1,13
	0,81	0,33	0,77	0,76	1,08	0,93	1,08
	1,11	0,32	0,91	0,87	1,24	0,96	1,04
	1,13	0,35	0,95	0,92	1,32	1,06	1,15
	0,98	0,32	0,85	0,83	1,17	0,90	1,06
	1,26	0,52	1,18	1,13	1,57	1,07	1,65
	1,34	0,53	1,24	1,17	1,63	1,10	1,68
	0,93	0,40	0,91	0,90	1,25	0,98	1,33
	0,81	0,35	0,79	0,78	1,08	0,84	1,15
	0,94	0,37	0,89	0,87	1,21	0,94	1,23
	1,50	0,43	1,23	1,19	1,67	1,23	1,43
	1,52	0,45	1,27	1,22	1,71	1,25	1,50
	1,49	0,47	1,28	1,23	1,73	1,26	1,57
	1,46	0,54	1,34	1,31	1,84	1,46	1,79
	1,05	0,40	0,97	0,95	1,33	1,04	1,32
MEDIA	1,07	0,40	0,99	0,96	1,36	1,06	1,31
DEVIAZIONE STANDARD	0,26	0,09	0,23	0,22	0,30	0,20	0,30

Tabella 11: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm piano interrato



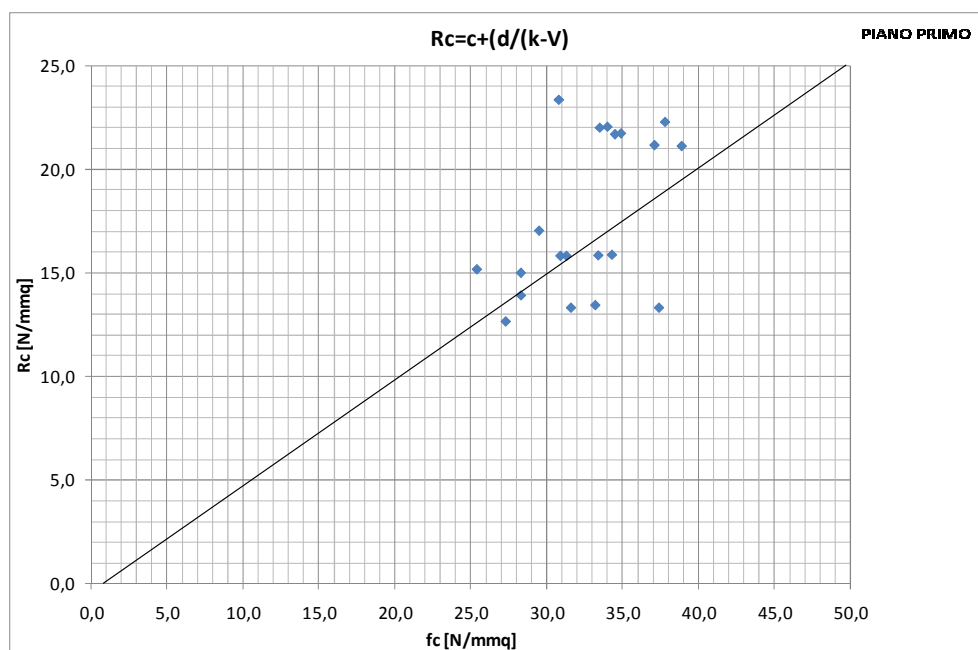
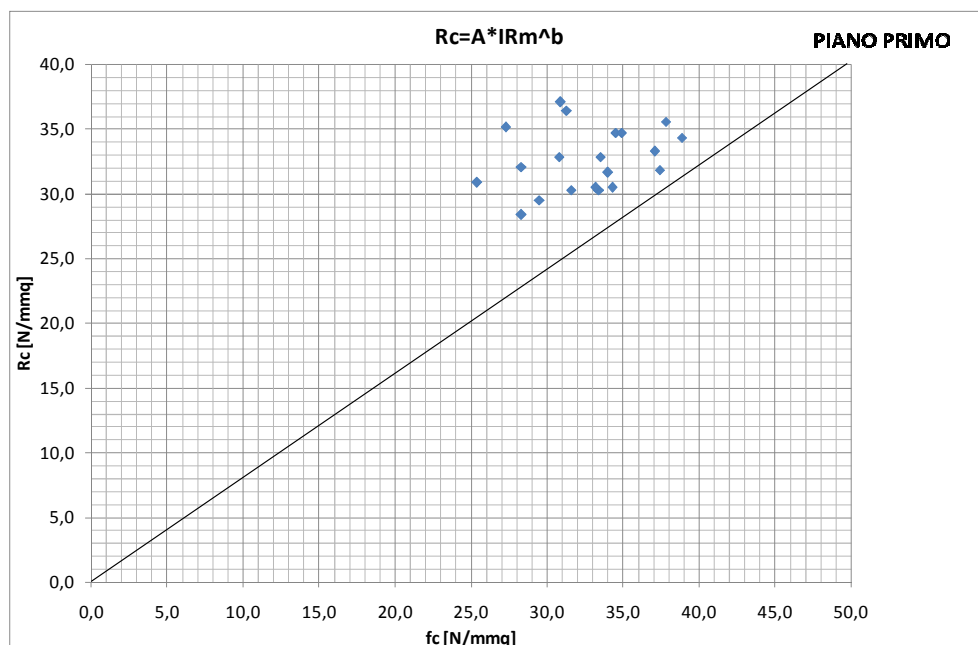


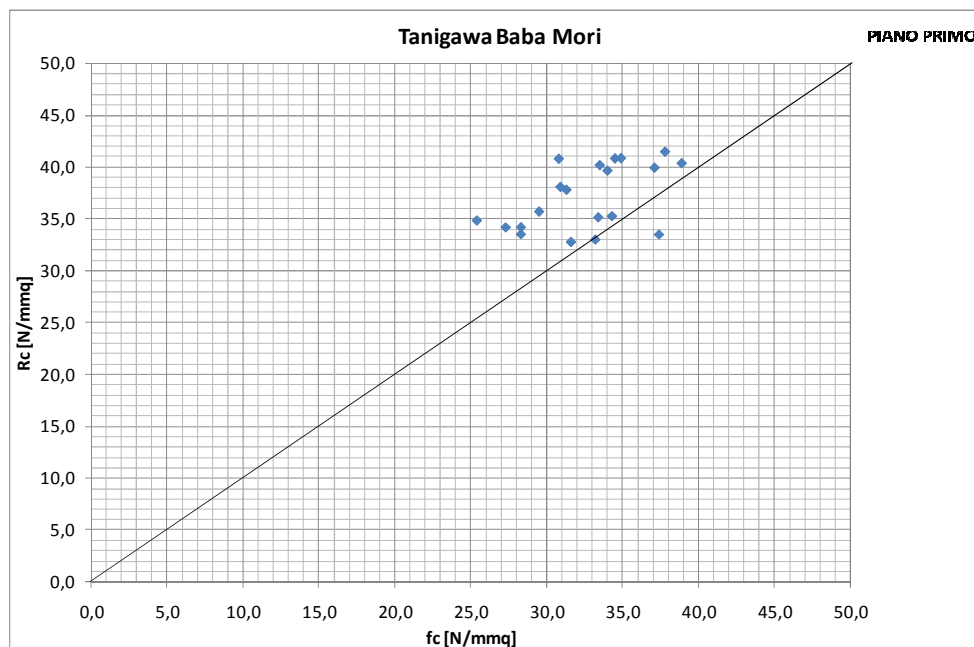
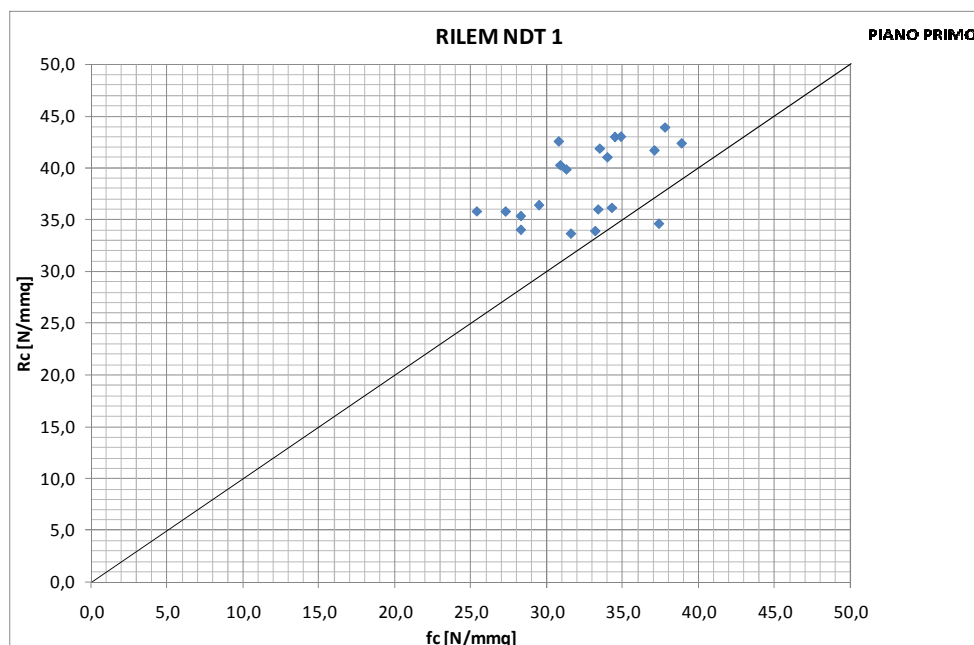


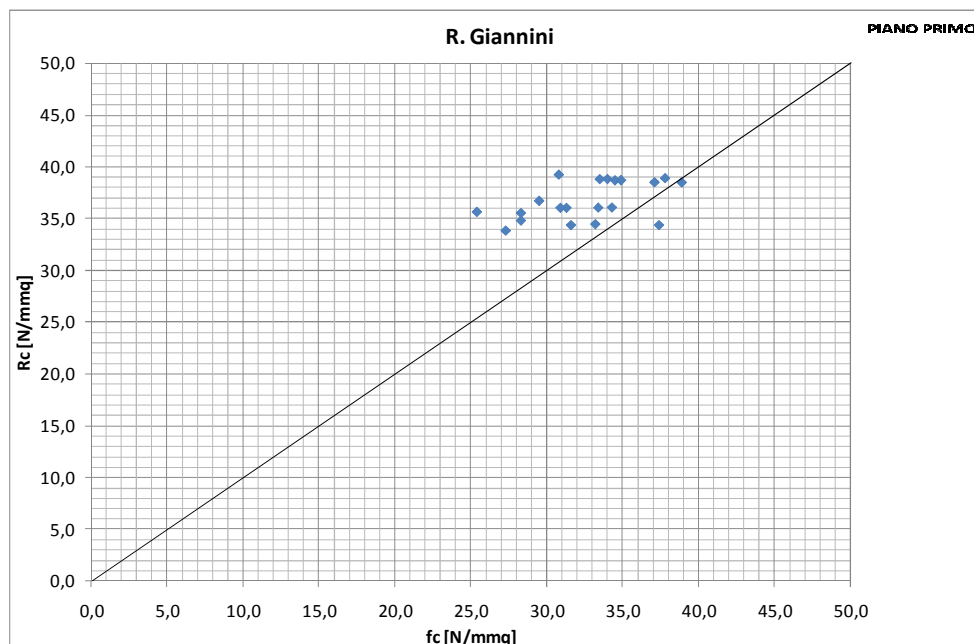
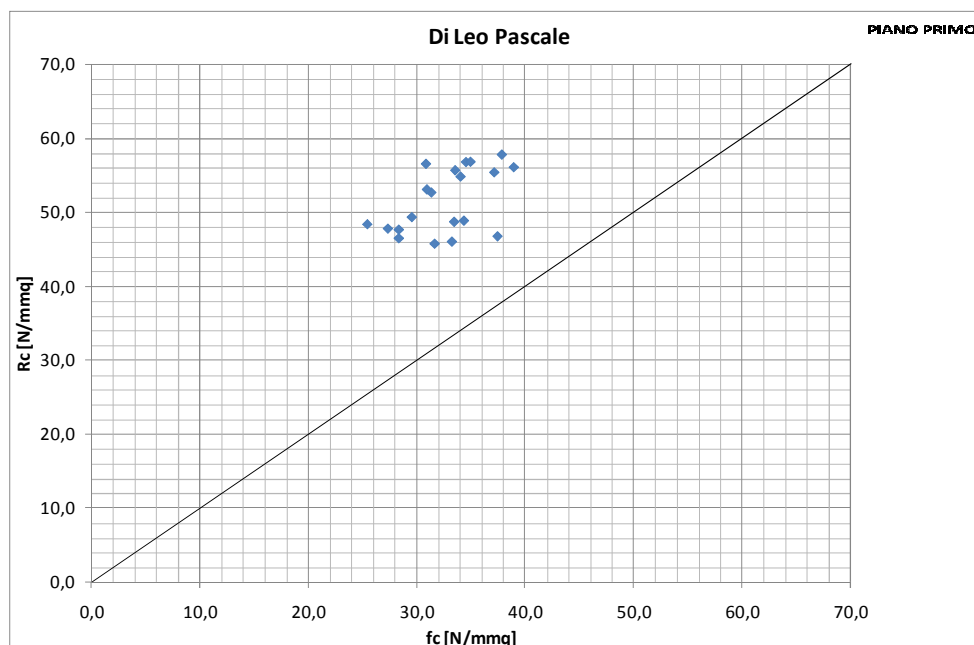


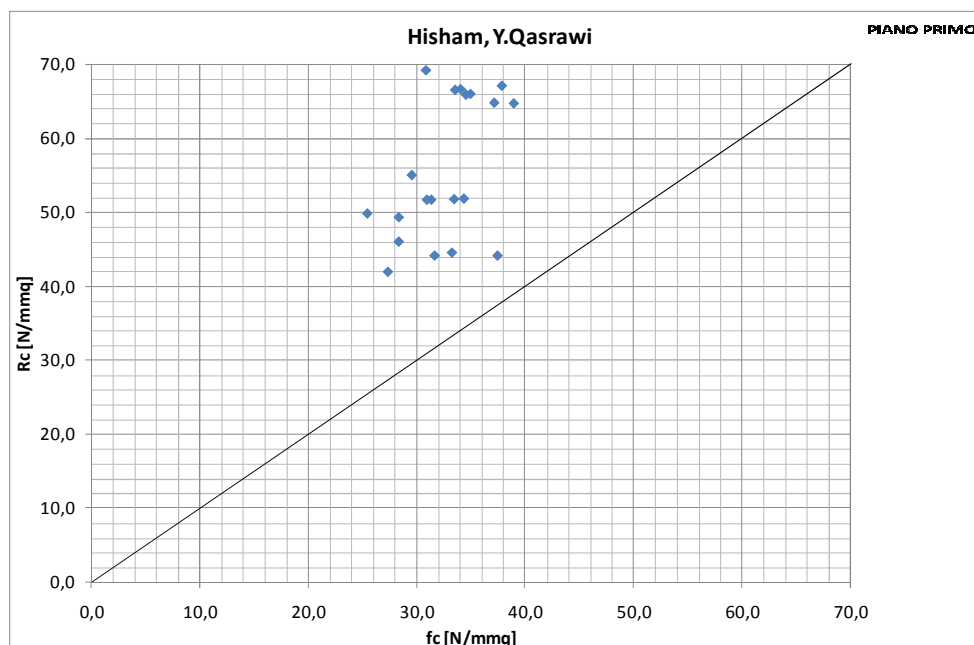
INDICE DI RIMBALZO	VELOCITÀ ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c
0,85	0,38	0,95	0,94	1,32	1,06	1,26
0,75	0,32	0,82	0,80	1,12	0,86	1,05
0,80	0,28	0,80	0,77	1,12	0,91	0,91
1,02	0,43	1,12	1,09	1,55	1,28	1,42
0,99	0,42	1,08	1,06	1,49	1,17	1,39
0,79	0,35	0,89	0,86	1,21	0,91	1,17
0,67	0,30	0,75	0,74	1,03	0,78	1,01
1,02	0,45	1,13	1,10	1,53	1,13	1,49
1,04	0,51	1,21	1,18	1,63	1,22	1,68
0,83	0,43	0,98	0,96	1,33	0,99	1,40
1,30	0,56	1,43	1,40	1,97	1,55	1,85
1,08	0,45	1,17	1,14	1,63	1,32	1,48
1,29	0,56	1,43	1,40	1,95	1,50	1,87
0,86	0,36	0,94	0,91	1,30	1,05	1,18
0,69	0,32	0,78	0,76	1,06	0,81	1,05
MEDIA	0,93	1,03	1,01	1,42	1,10	1,35
DEVIAZIONE STANDARD	0,19	0,09	0,21	0,21	0,29	0,29

Tabella 12: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm piano terra.



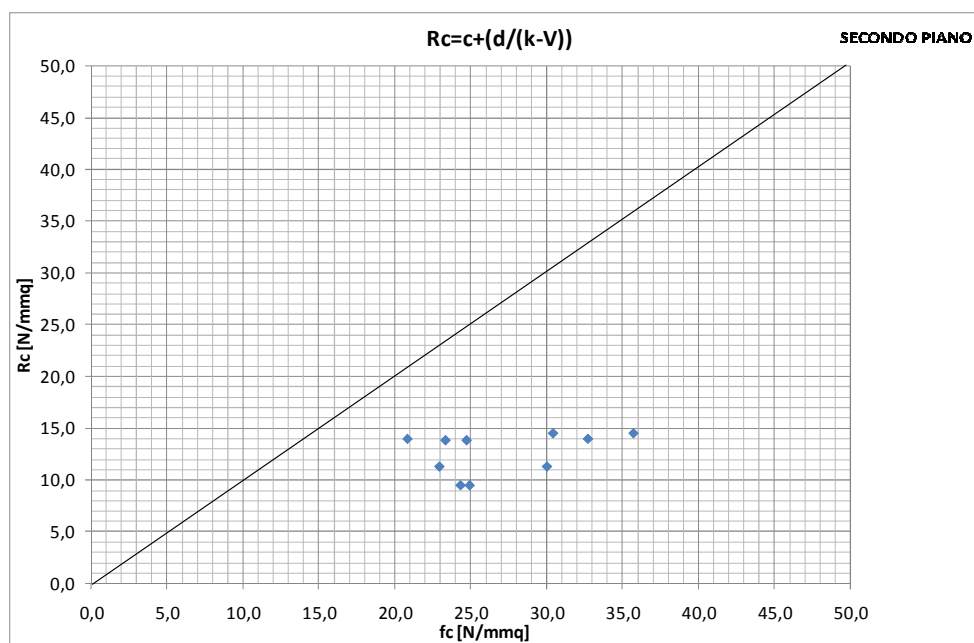
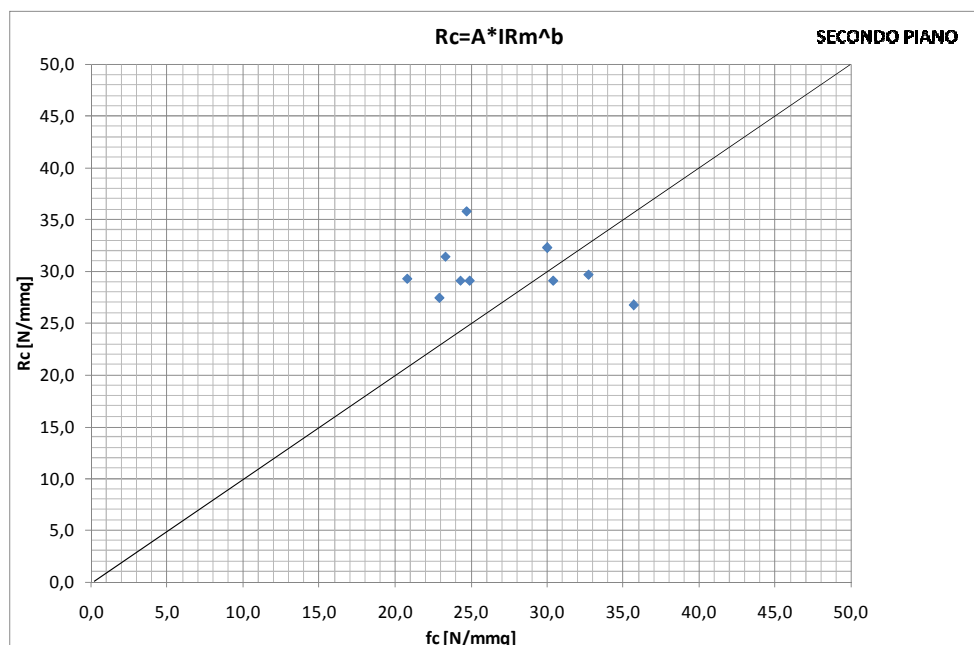


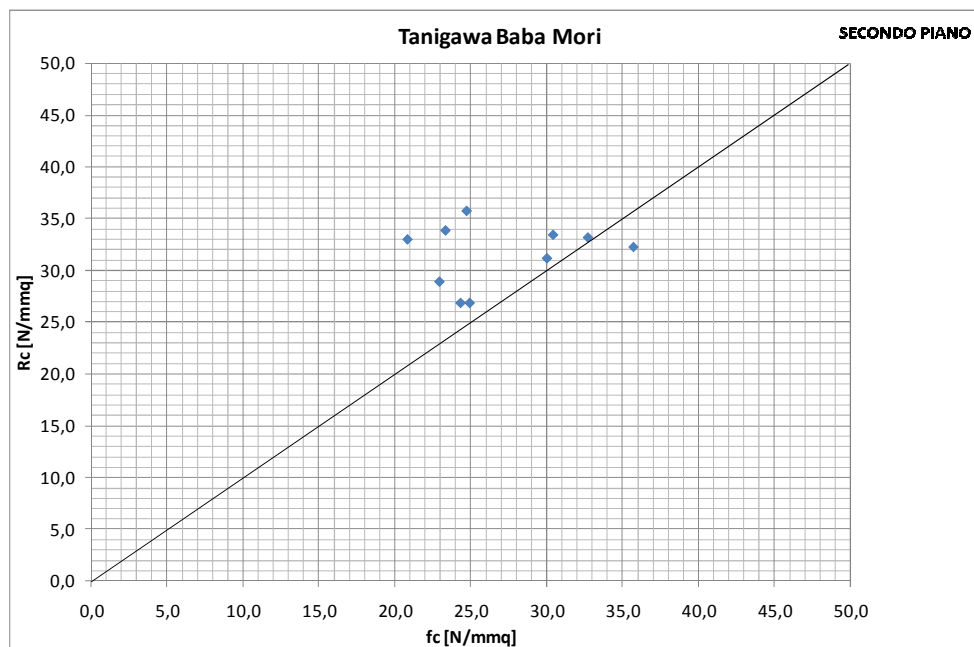
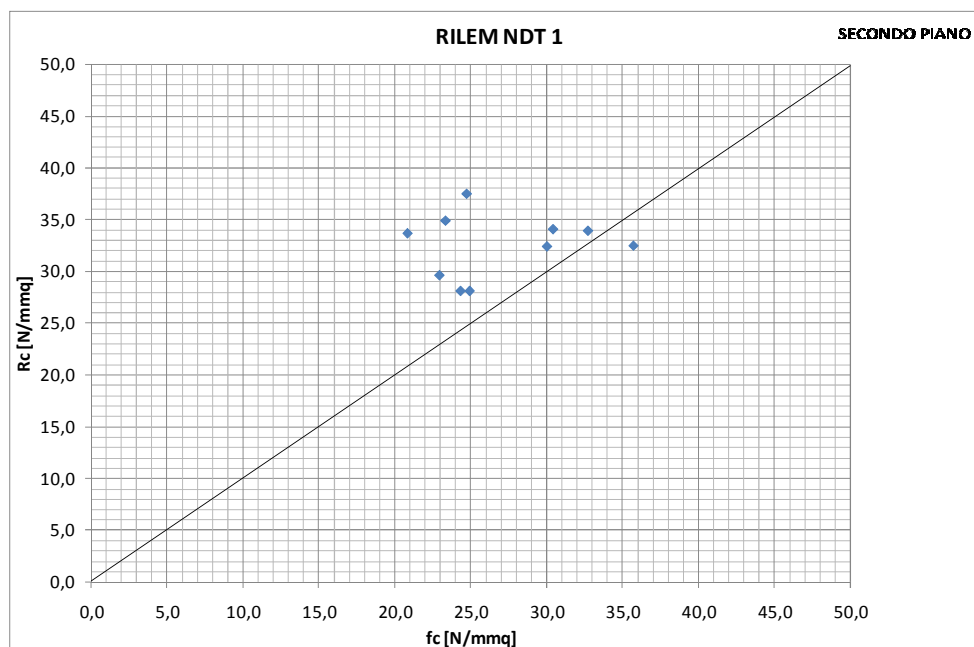


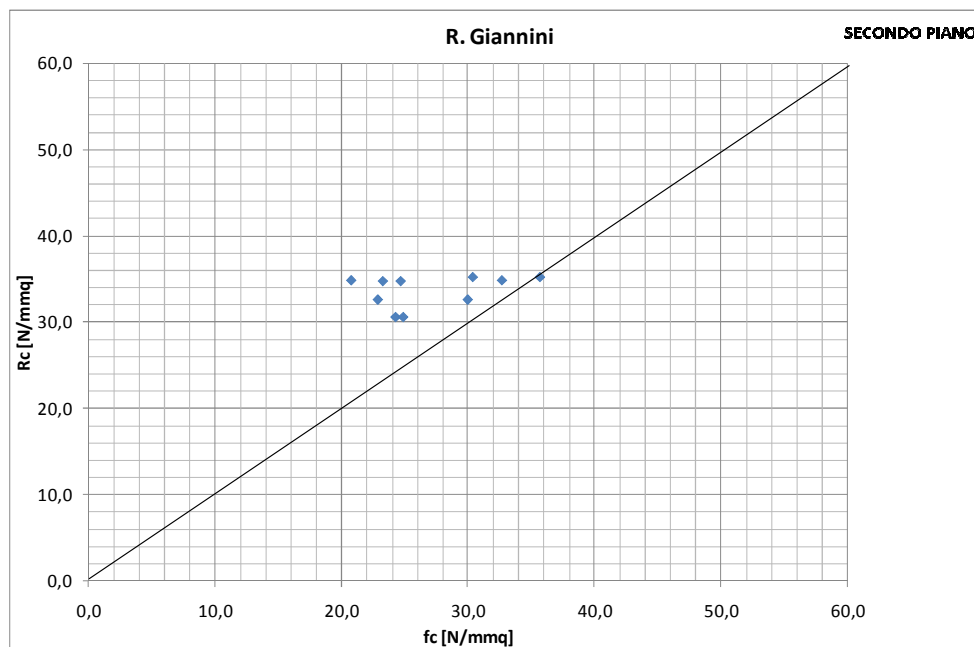
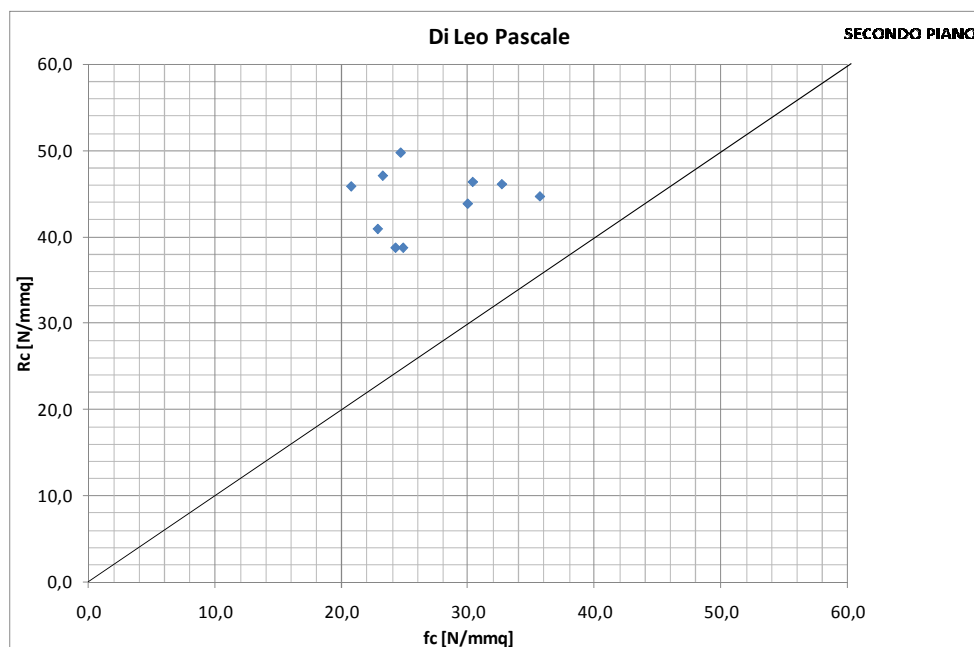


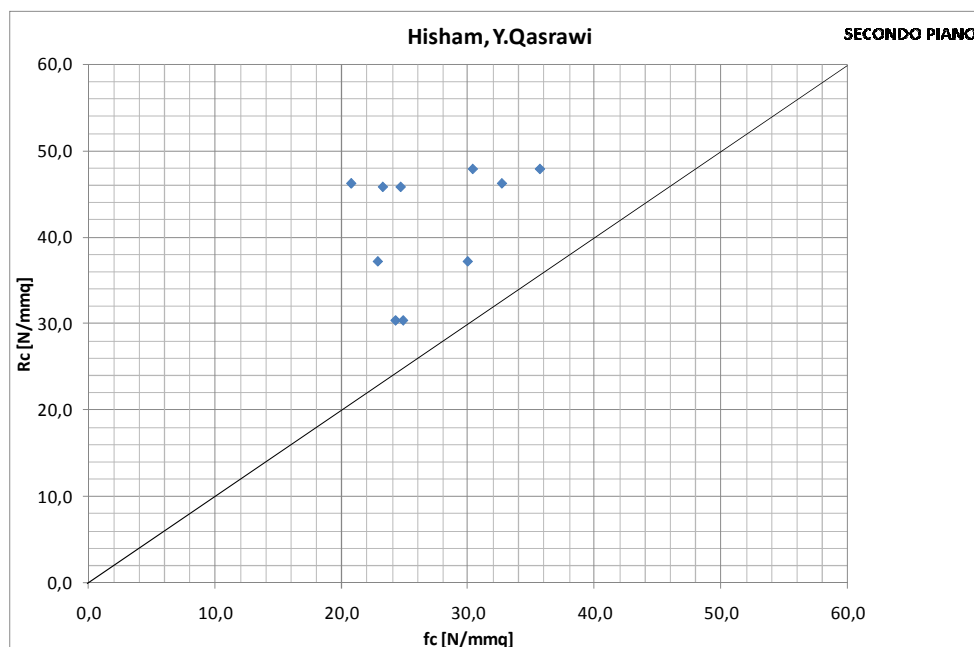
	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc
	0,96	0,42	1,06	1,04	1,45	1,09	1,40
	0,85	0,36	0,93	0,89	1,25	0,92	1,18
	1,16	0,51	1,27	1,21	1,68	1,15	1,65
	1,20	0,51	1,30	1,23	1,72	1,17	1,67
	1,29	0,46	1,31	1,25	1,75	1,24	1,54
	0,91	0,47	1,08	1,05	1,46	1,08	1,55
	0,89	0,46	1,05	1,03	1,42	1,05	1,51
	1,00	0,53	1,20	1,18	1,64	1,26	1,74
	1,22	0,60	1,41	1,37	1,90	1,40	1,96
	1,00	0,58	1,23	1,21	1,67	1,25	1,86
	1,01	0,63	1,25	1,18	1,65	1,12	1,91
	0,99	0,62	1,23	1,17	1,63	1,11	1,89
	0,93	0,65	1,21	1,17	1,61	1,14	1,96
	0,88	0,54	1,09	1,04	1,44	0,99	1,66
	0,98	0,66	1,25	1,20	1,66	1,16	1,99
	0,94	0,59	1,16	1,10	1,53	1,03	1,77
	0,92	0,41	1,02	0,99	1,39	1,04	1,34
	1,13	0,49	1,25	1,21	1,68	1,23	1,63
	0,90	0,57	1,12	1,08	1,49	1,04	1,75
	1,07	0,76	1,38	1,32	1,84	1,28	2,25
MEDIA	1,01	0,54	1,19	1,15	1,59	1,14	1,71
DEVIAZIONE STANDARD	0,13	0,10	0,12	0,12	0,16	0,11	0,25

Tabella 13: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm primo piano



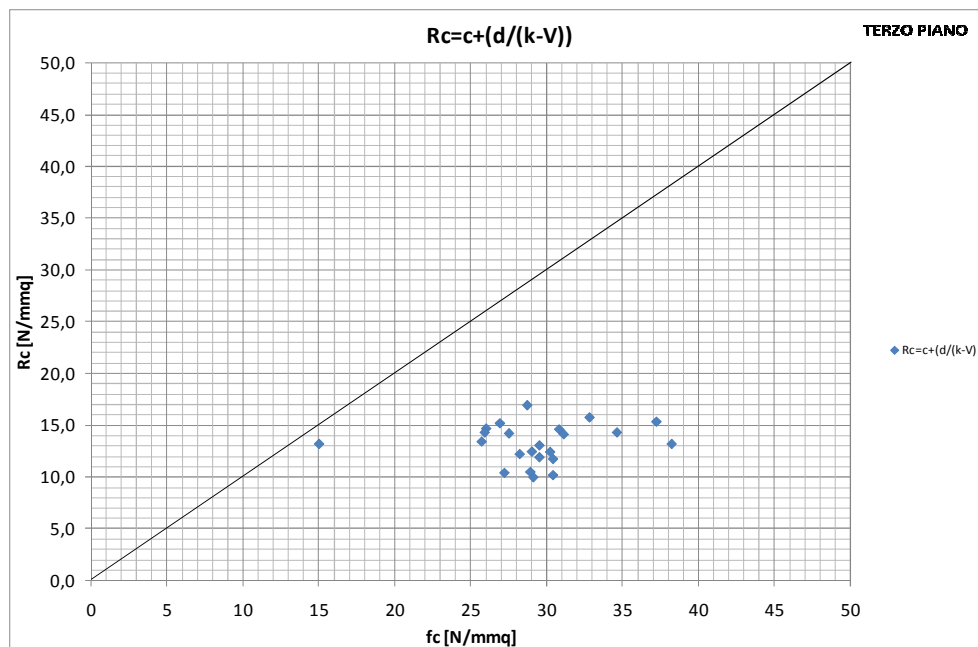
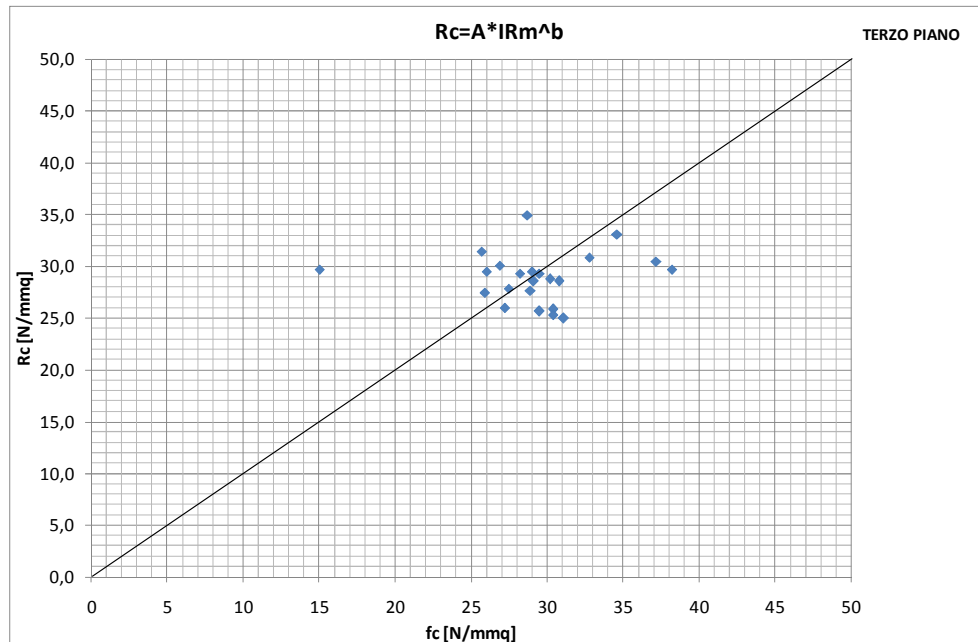


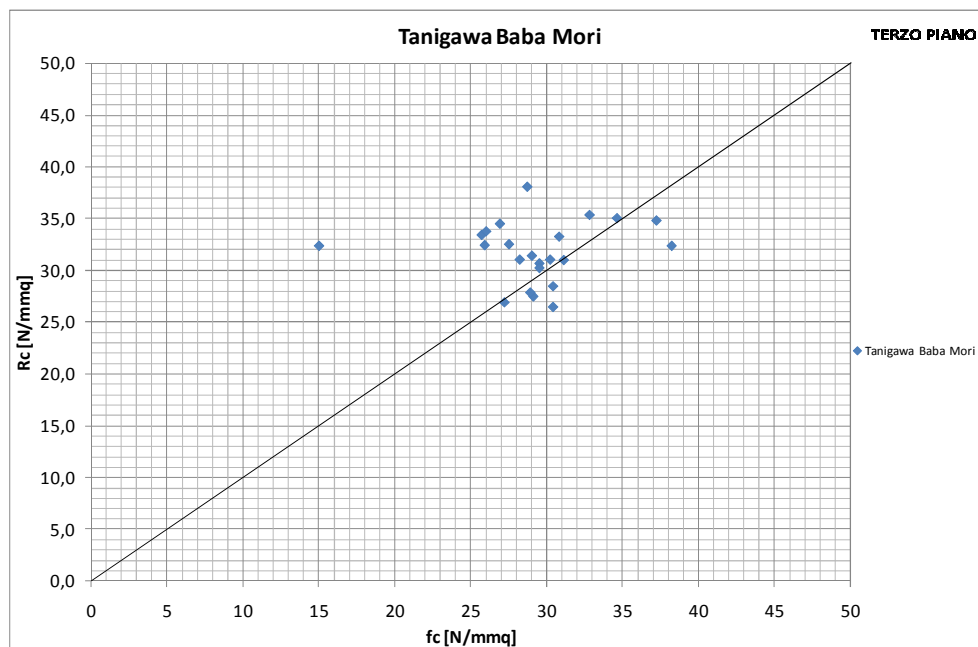
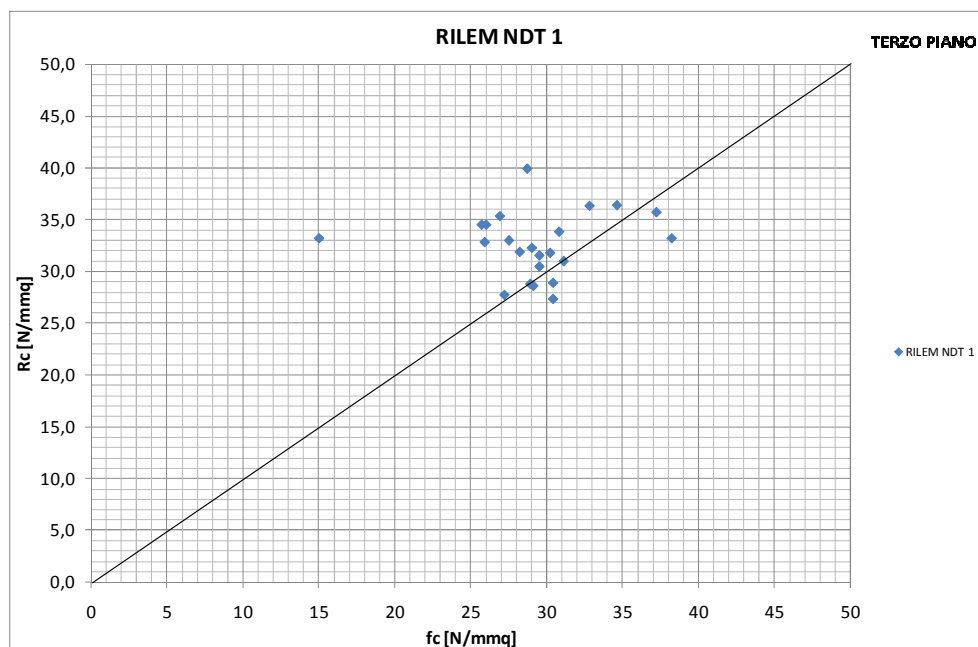


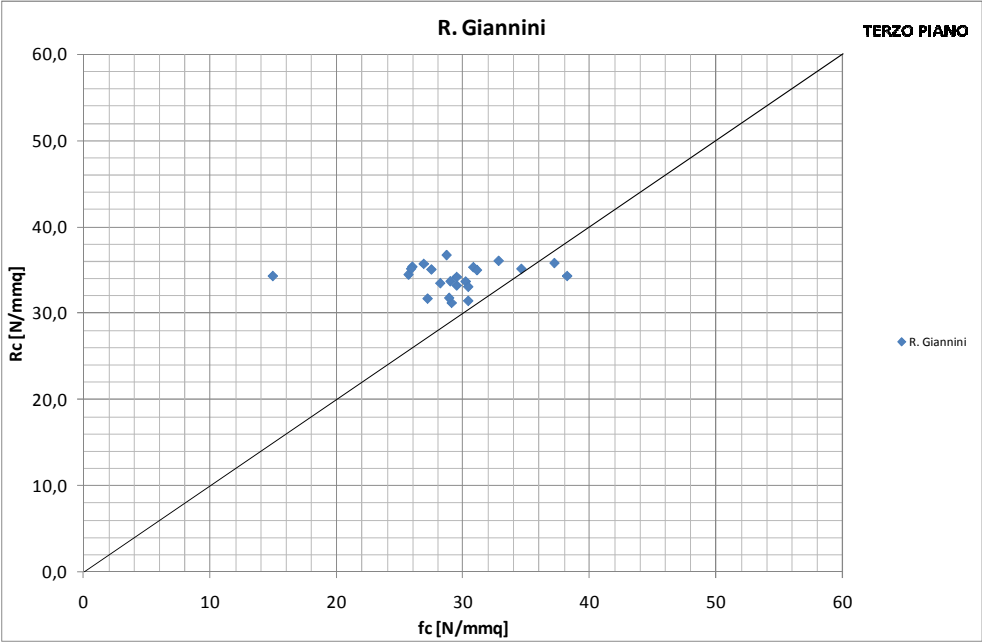
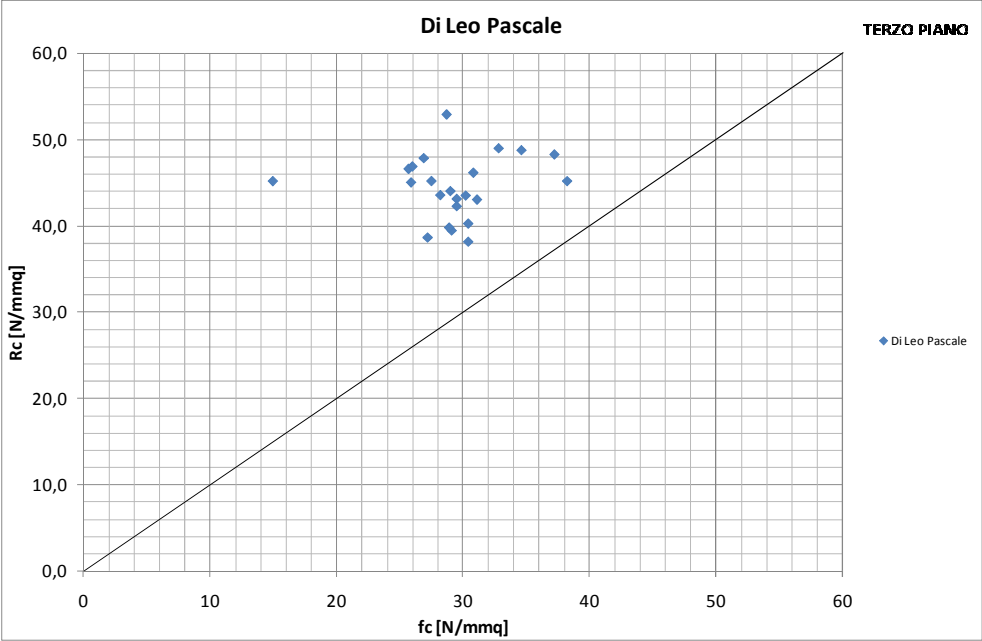


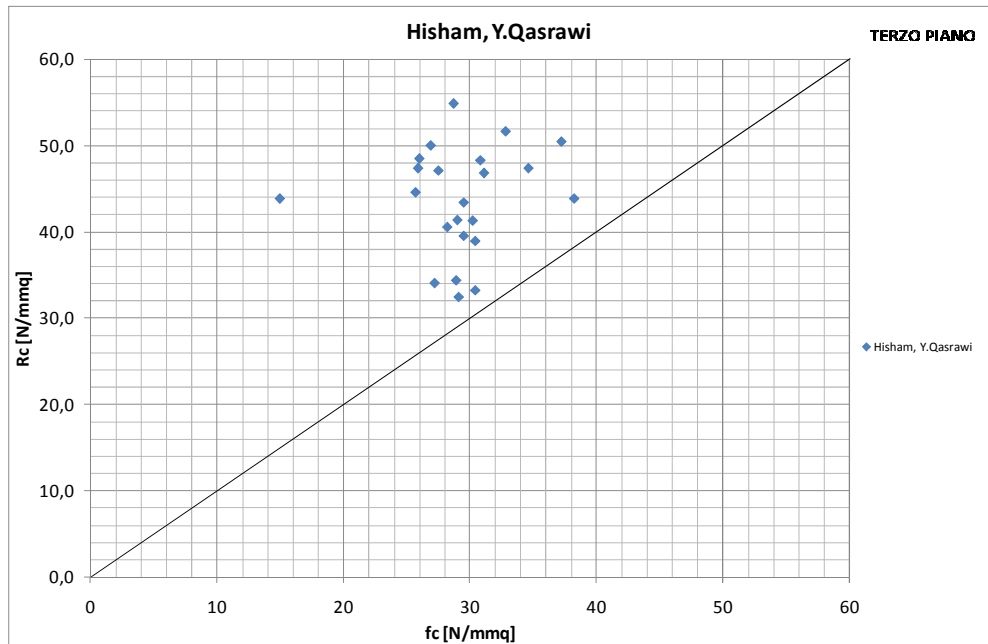
	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc	Rc/fc
	1,20	0,39	1,16	1,11	1,60	1,26	1,25
	1,17	0,38	1,13	1,08	1,56	1,23	1,22
	1,45	0,56	1,52	1,45	2,02	1,41	1,86
	1,35	0,59	1,50	1,45	2,02	1,49	1,97
	1,41	0,67	1,62	1,59	2,21	1,68	2,22
	0,91	0,43	1,04	1,01	1,41	1,07	1,41
	0,75	0,41	0,91	0,90	1,25	0,99	1,34
	0,96	0,48	1,12	1,10	1,53	1,16	1,58
	1,08	0,38	1,08	1,04	1,46	1,09	1,24
	1,20	0,49	1,30	1,26	1,79	1,42	1,63
MEDIA	1,15	0,48	1,24	1,20	1,68	1,28	1,57
DEVIAZIONE STANDARD	0,23	0,10	0,24	0,23	0,31	0,22	0,35

Tabella 14: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm secondo piano



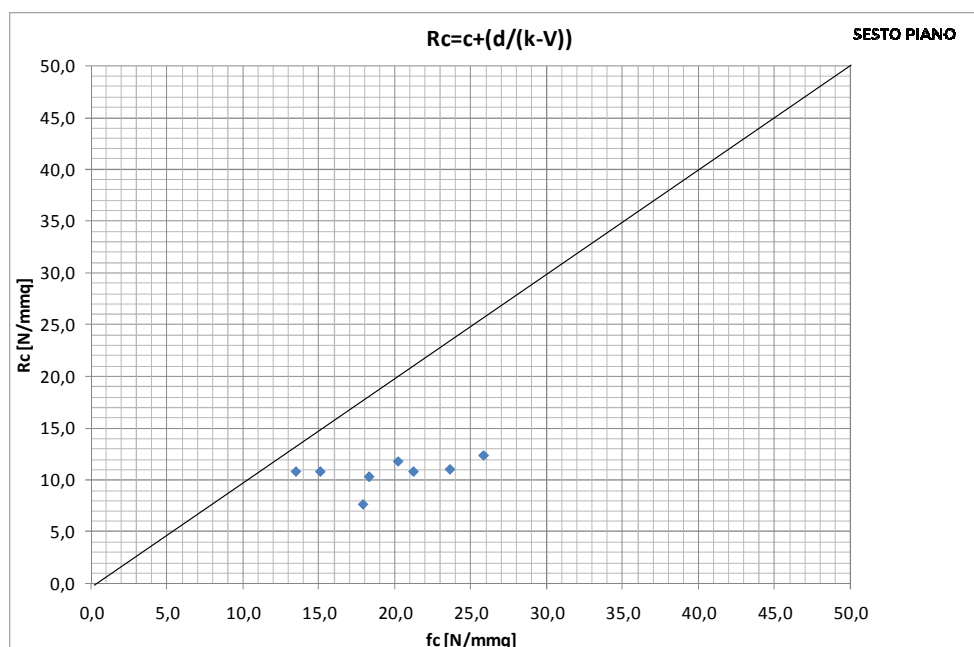
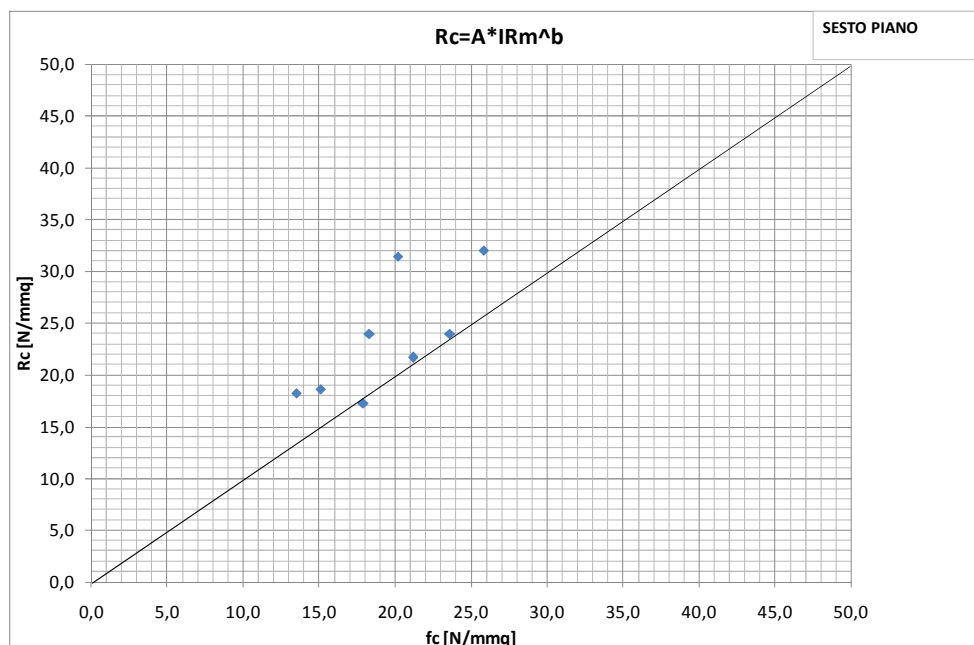


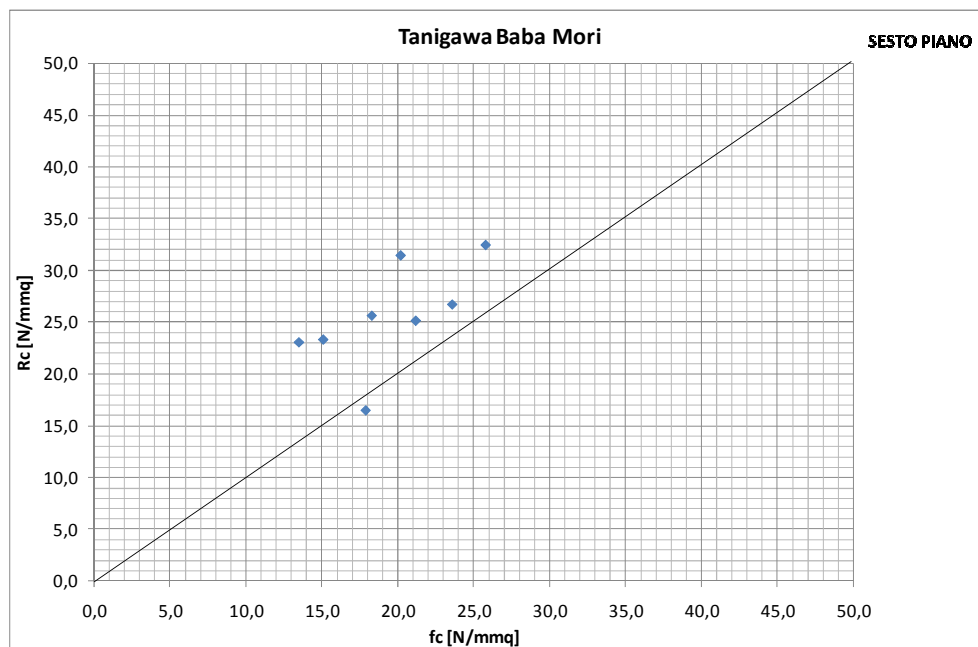
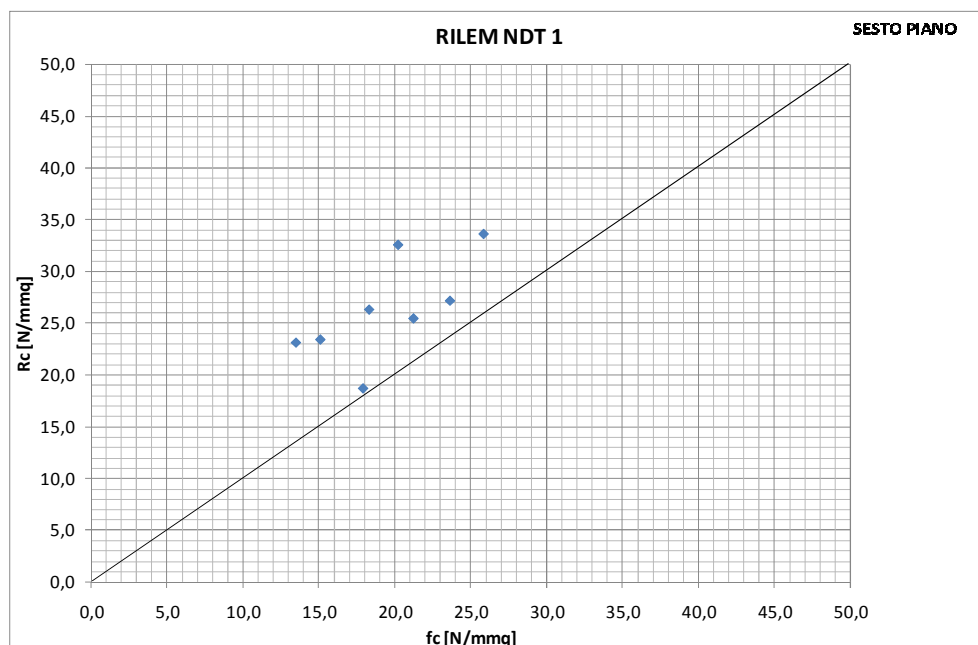


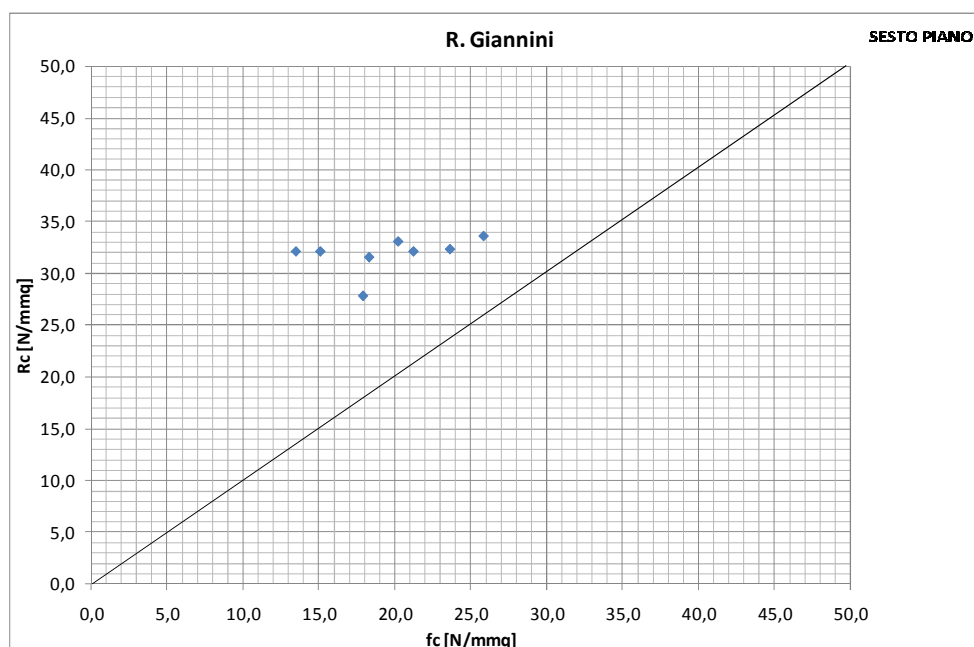
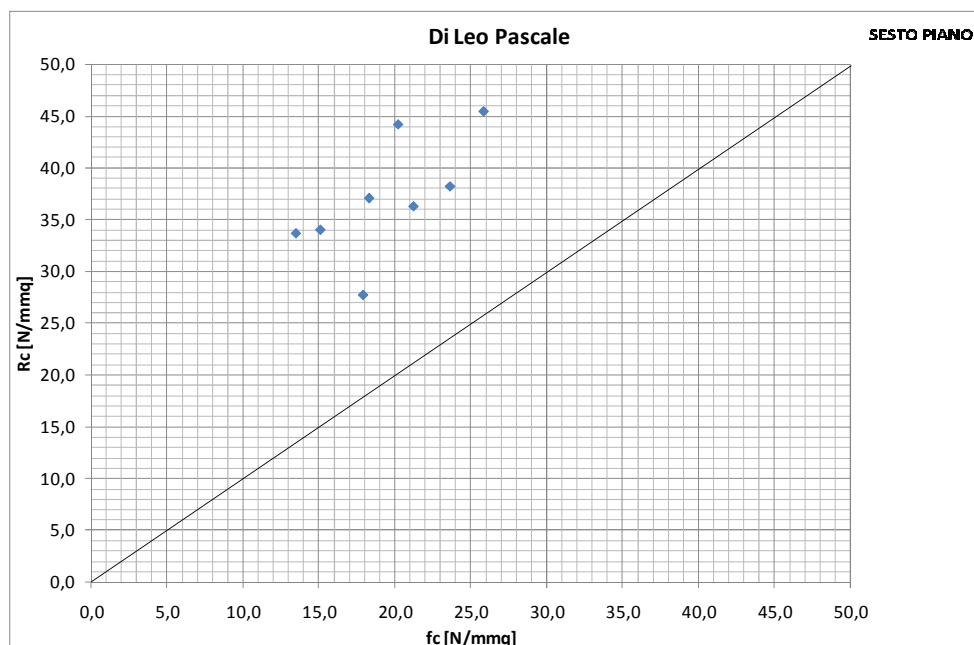


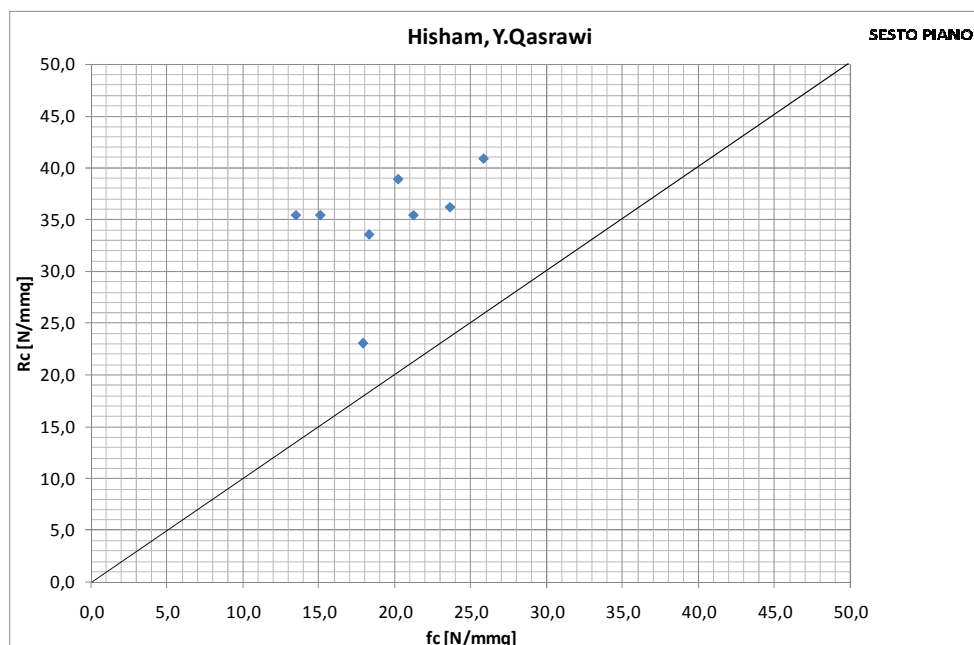
INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA' ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c
0,98	0,34	0,98	0,94	1,36	1,07	1,11
0,85	0,34	0,90	0,87	1,25	1,03	1,09
0,96	0,36	1,00	0,96	1,38	1,10	1,19
0,99	0,40	1,07	1,04	1,46	1,13	1,34
1,04	0,43	1,13	1,10	1,55	1,19	1,44
0,95	0,41	1,05	1,03	1,44	1,11	1,37
1,12	0,57	1,31	1,28	1,78	1,33	1,86
0,93	0,48	1,10	1,08	1,50	1,15	1,57
0,83	0,39	0,95	0,94	1,32	1,09	1,28
0,96	0,38	1,02	0,99	1,42	1,17	1,25
1,02	0,43	1,11	1,08	1,52	1,16	1,43
1,22	0,52	1,34	1,30	1,81	1,34	1,73
1,14	0,57	1,33	1,30	1,80	1,36	1,86
1,22	0,59	1,39	1,33	1,85	1,28	1,91
0,87	0,44	1,03	1,02	1,43	1,16	1,47
0,80	0,46	1,00	1,00	1,38	1,13	1,50
0,96	0,41	1,05	1,01	1,41	1,01	1,37
1,06	0,55	1,27	1,25	1,74	1,36	1,83
1,01	0,52	1,20	1,18	1,64	1,27	1,71
0,94	0,48	1,11	1,08	1,49	1,10	1,57
1,98	0,88	2,21	2,16	3,01	2,29	2,92
0,78	0,35	0,87	0,85	1,18	0,90	1,15
0,82	0,41	0,96	0,94	1,30	0,96	1,36
MEDIA	1,02	0,47	1,15	1,12	1,57	1,20
DEVIAZIONE STANDARD	0,24	0,12	0,27	0,27	0,37	0,27

Tabella 15: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm terzo piano



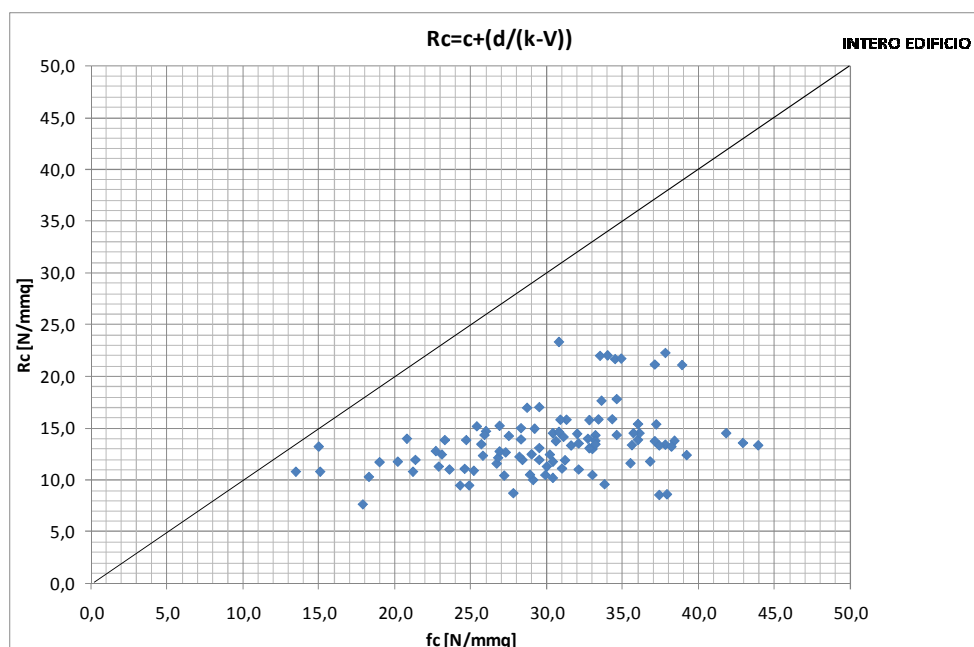
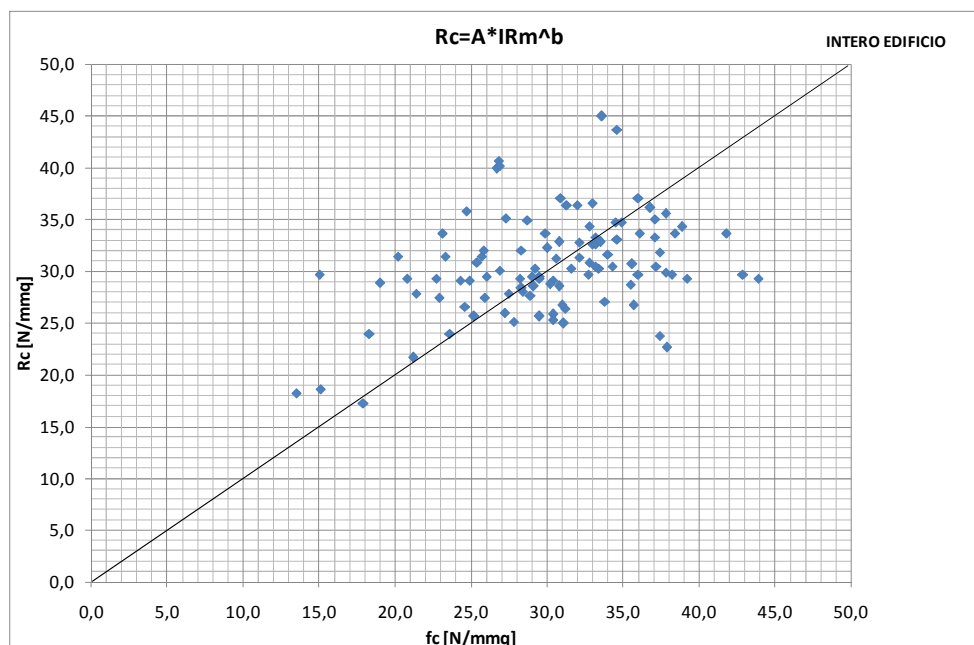


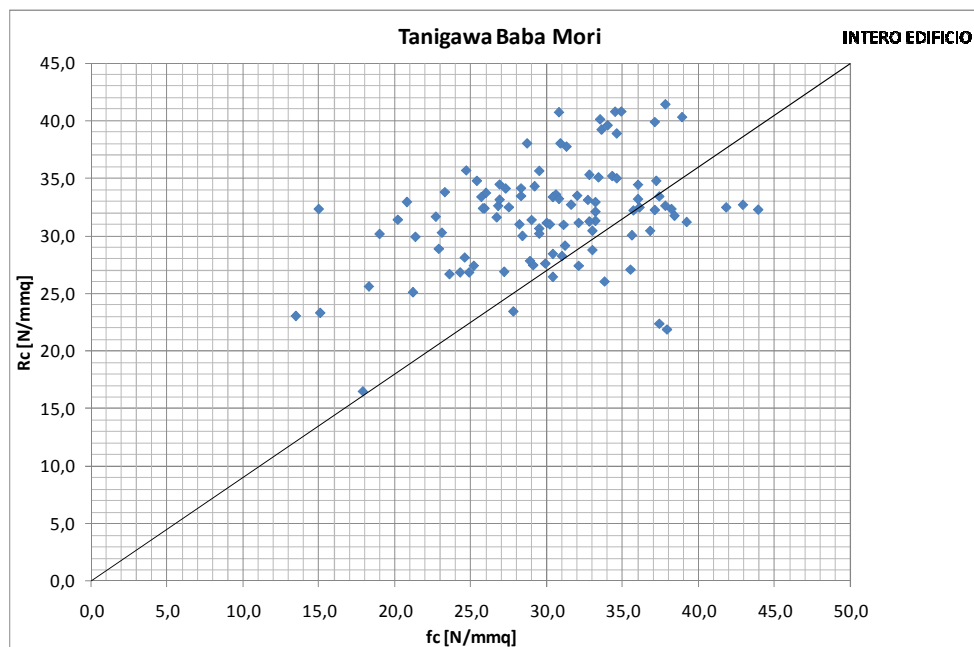
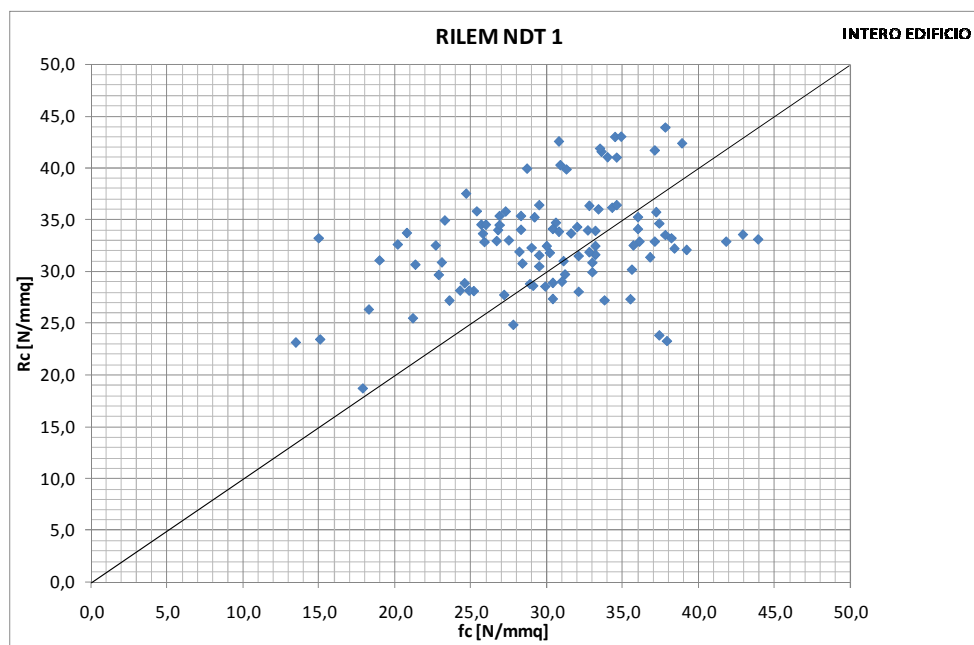


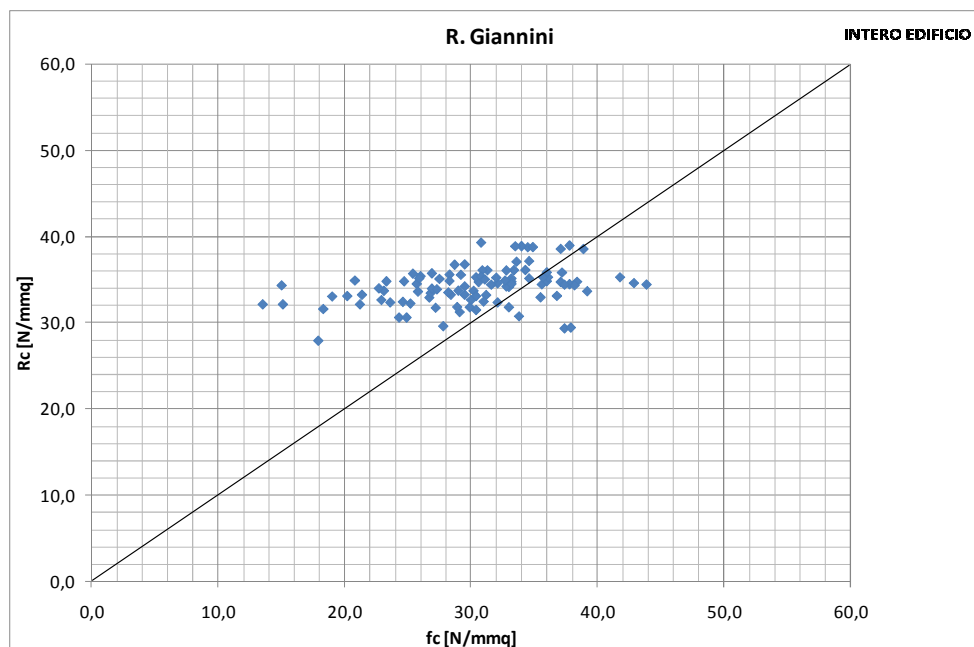
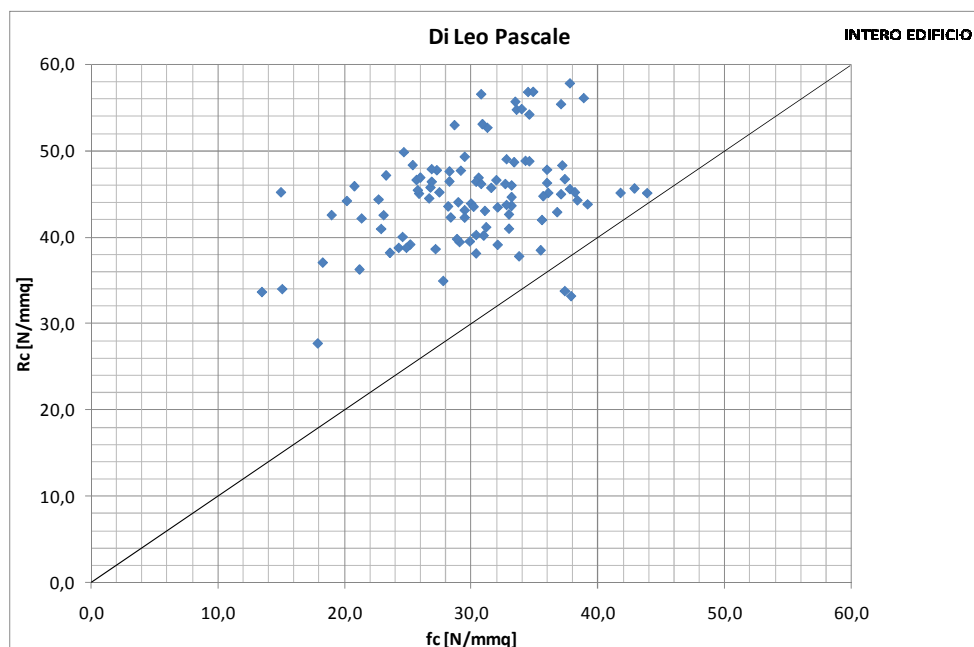


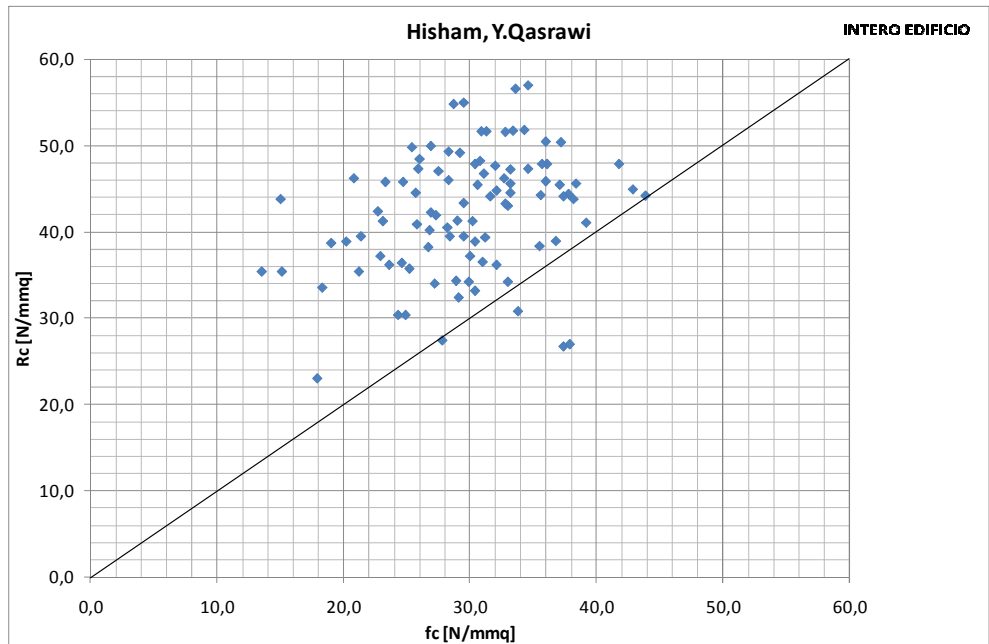
	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITÀ ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c	R_c/f_c
	1,31	0,56	1,44	1,40	2,03	1,72	1,83
	1,02	0,47	1,15	1,13	1,62	1,37	1,53
	0,96	0,43	1,05	0,92	1,55	1,56	1,29
	1,56	0,58	1,61	1,56	2,19	1,64	1,93
	1,24	0,48	1,30	1,26	1,76	1,30	1,59
	1,02	0,51	1,20	1,19	1,71	1,51	1,67
	1,24	0,71	1,55	1,55	2,25	2,13	2,35
	1,35	0,80	1,71	1,71	2,49	2,38	2,62
MEDIA	1,21	0,57	1,38	1,34	1,95	1,70	1,85
DEVIAZIONE STANDARD	0,20	0,13	0,24	0,26	0,34	0,37	0,44

Tabella 16: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm sesto piano





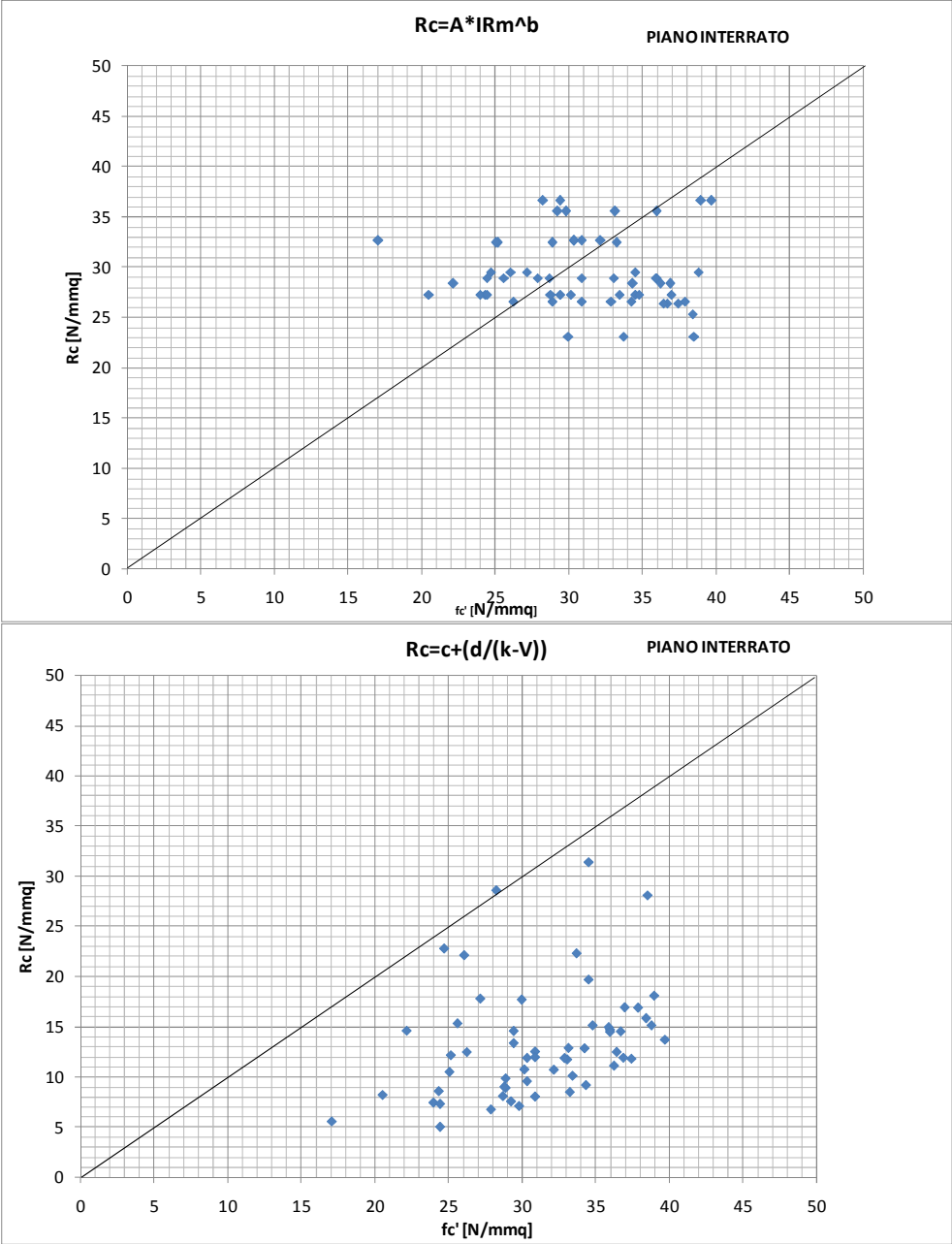


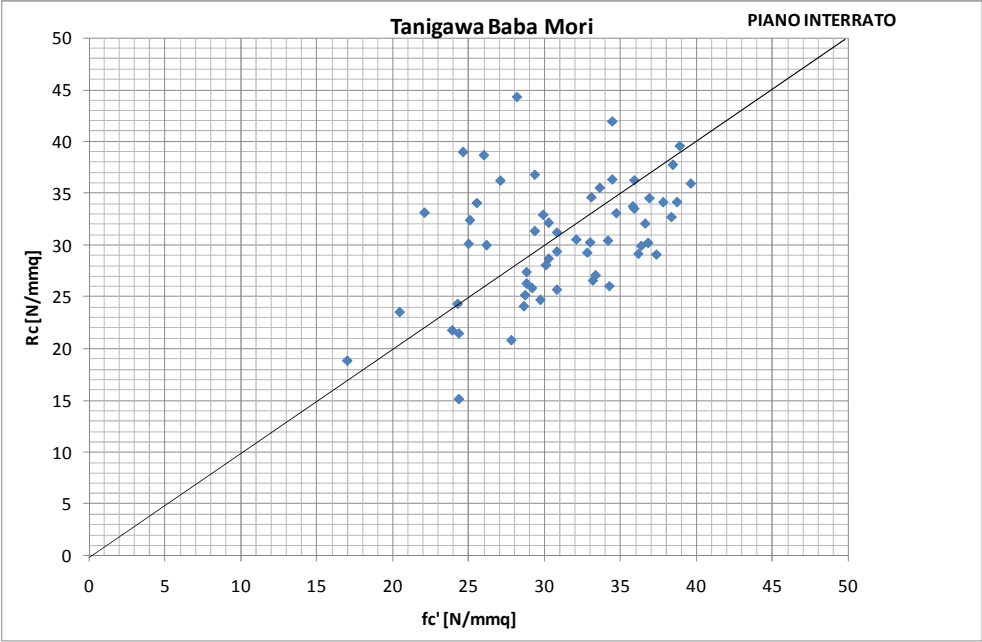
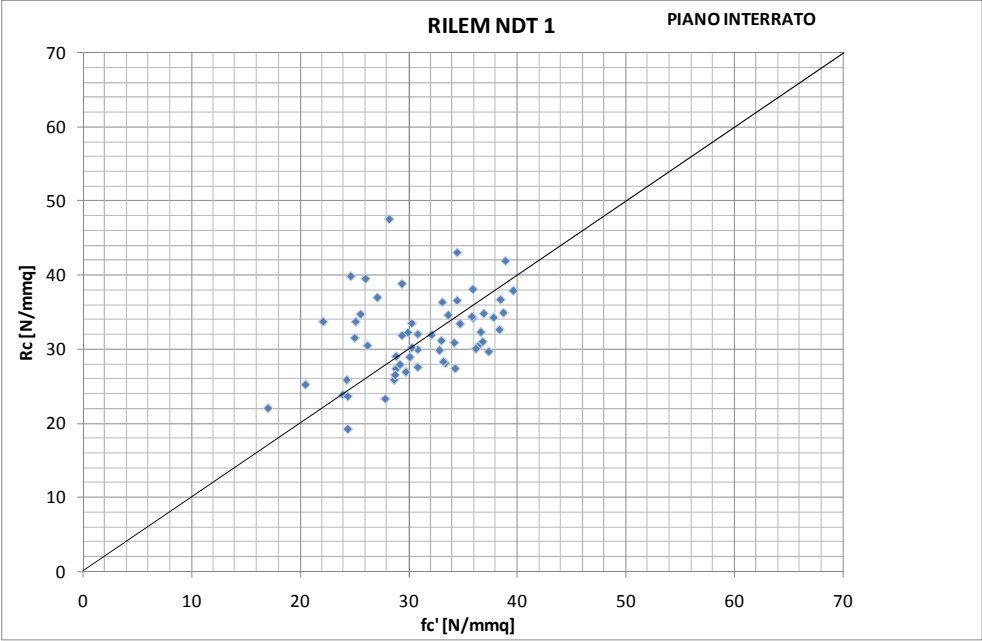


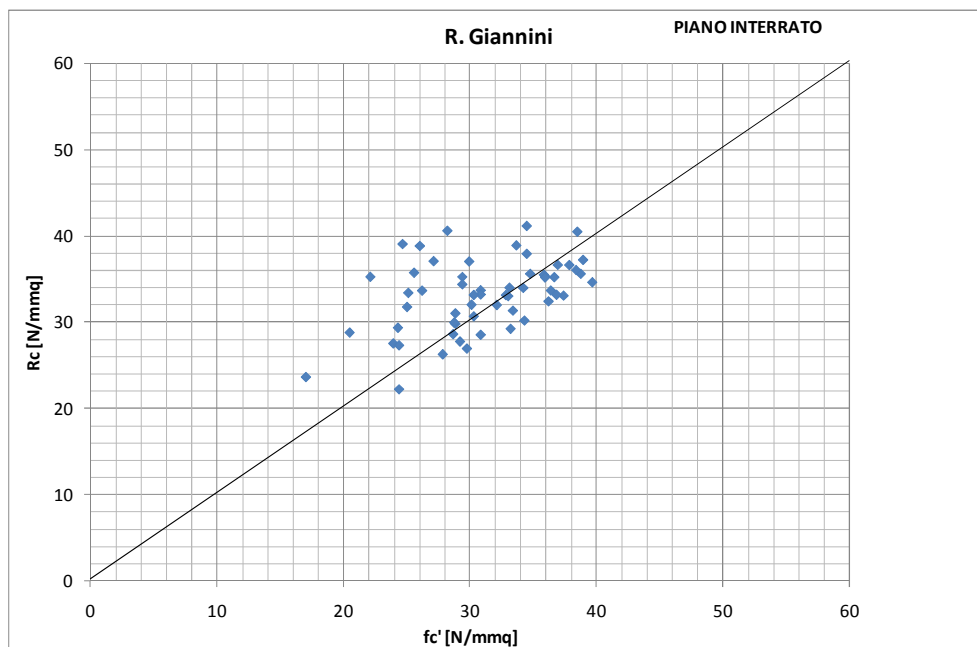
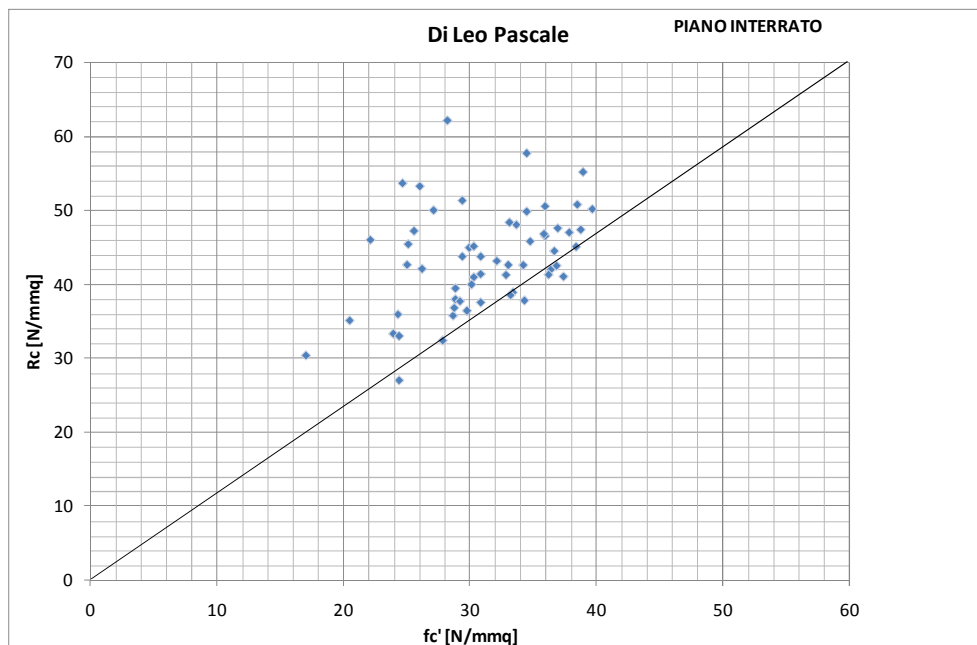
	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
	R_c/f_c'	R_c/f_c'	R_c/f_c'	R_c/f_c'	R_c/f_c'	R_c/f_c'	R_c/f_c'
MEDIA	1,08	0,37	1,25	1,20	1,69	1,27	1,80
DEVIAZIONE STANDARD	0,28	4,24	0,35	0,35	0,46	0,32	0,77

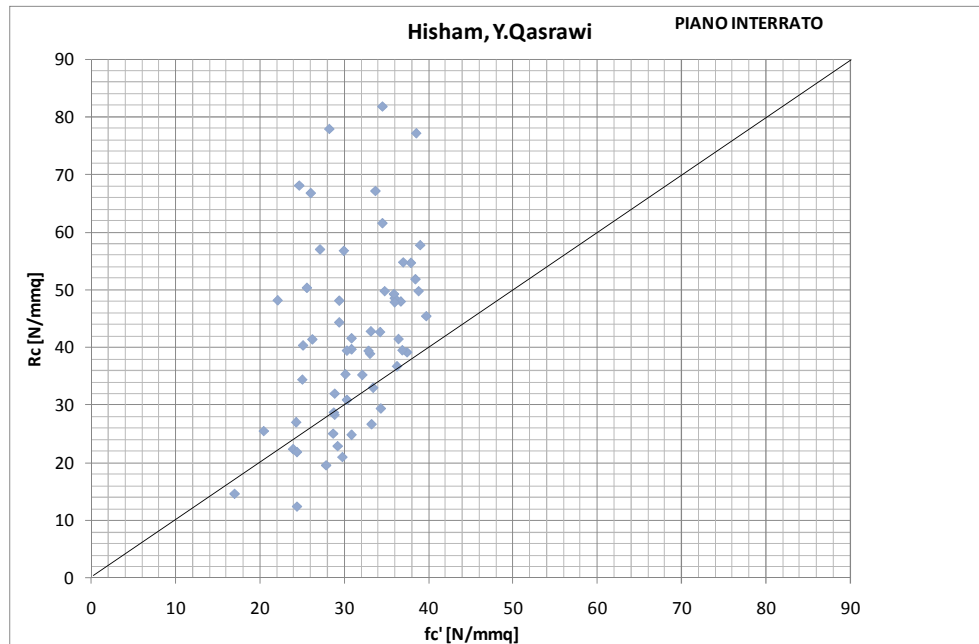
Tabella 17: Riepilogo scarto quadratico medio carote Ø 100 mm intero edificio

MICROCAROTE Φ 32 mm





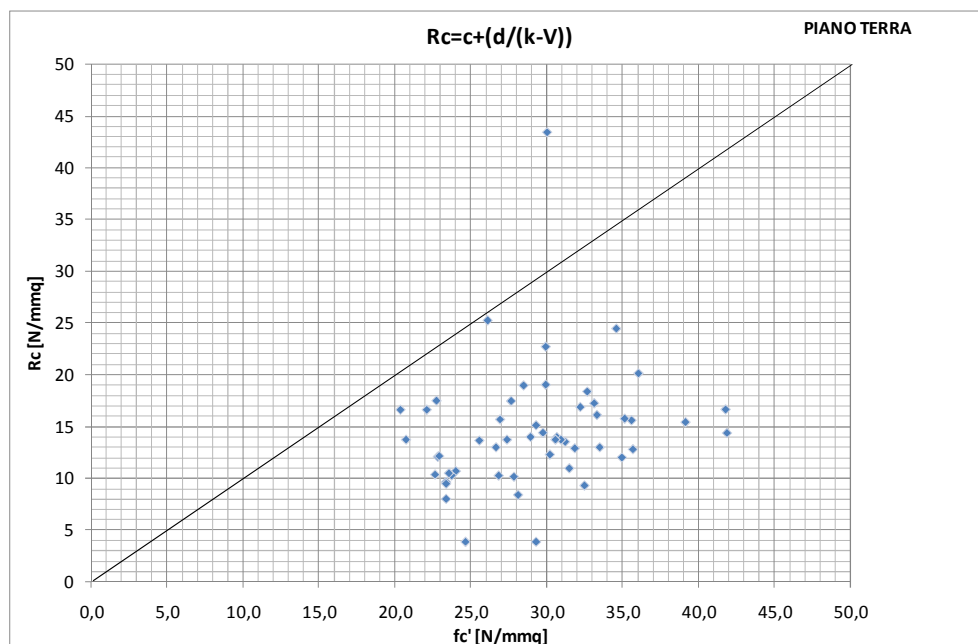
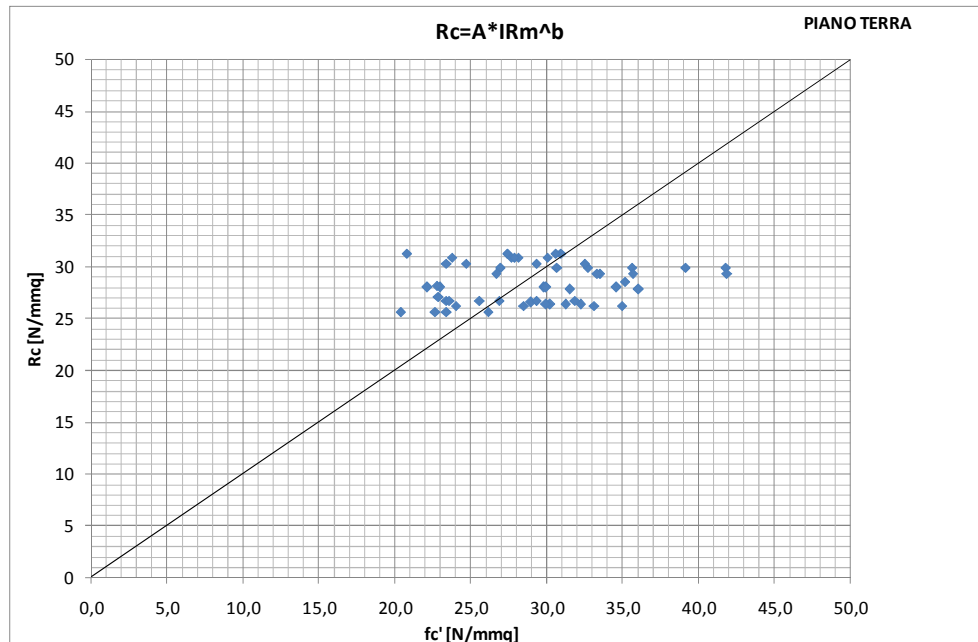


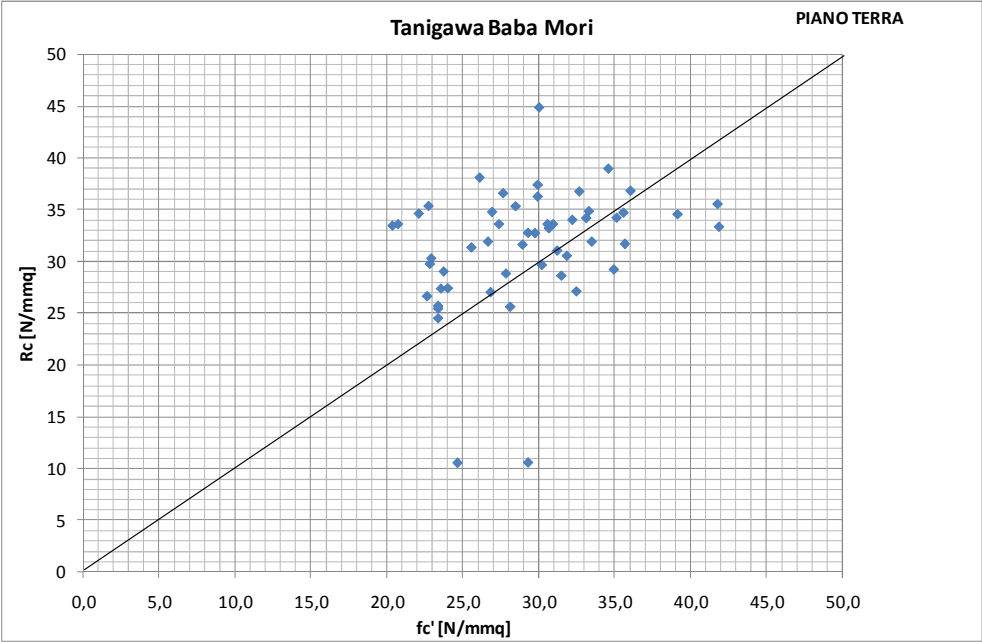
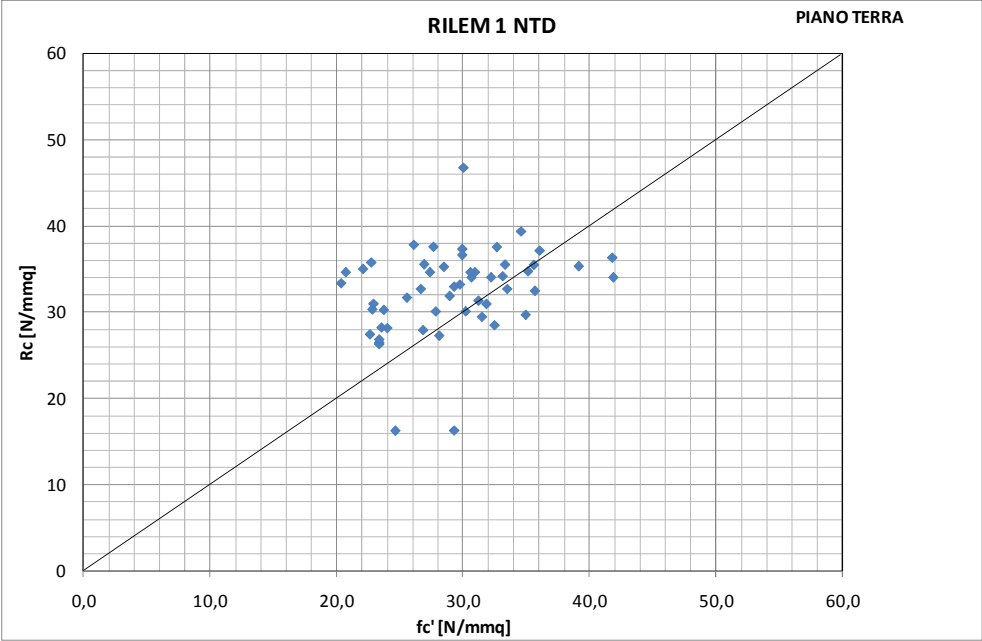


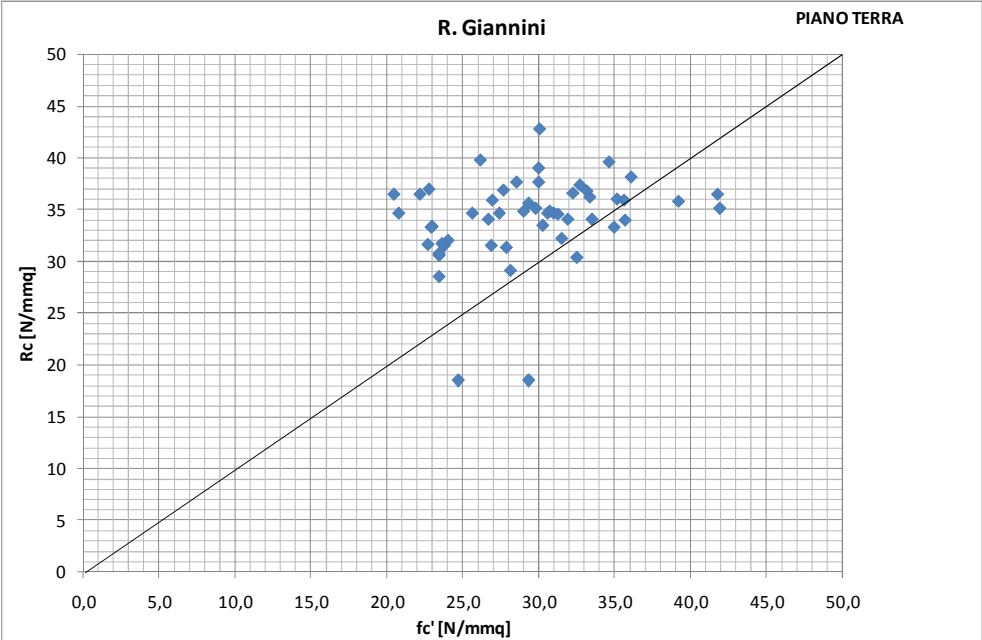
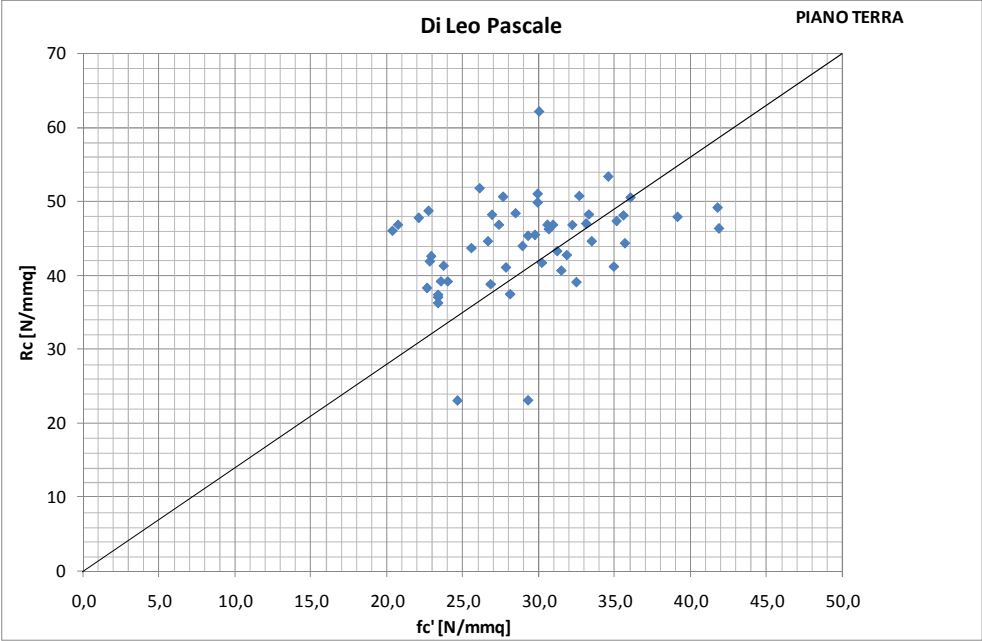
Grafici Carote Ø 32 mm

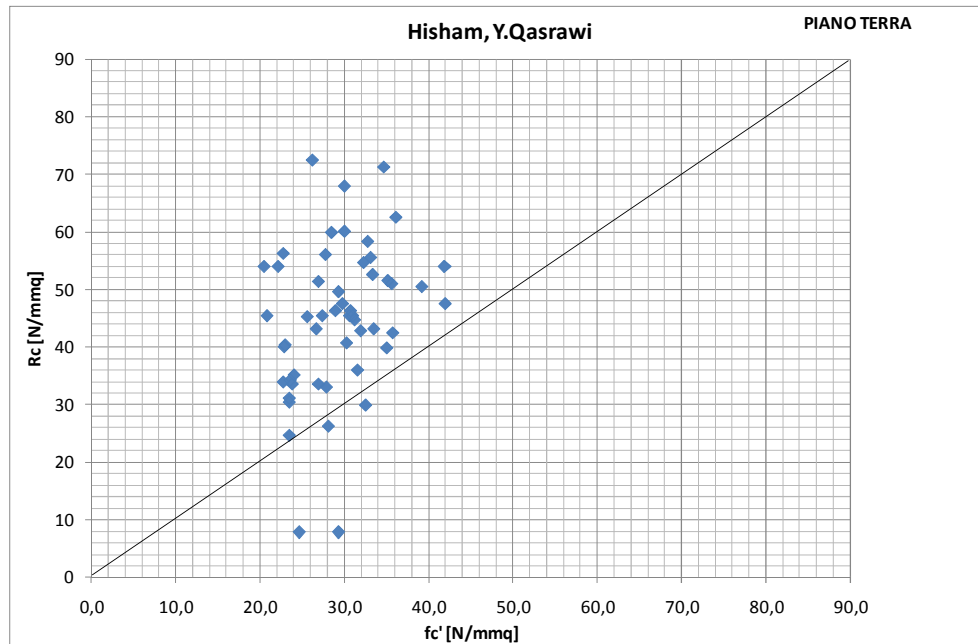
INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA' ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y. Qasrawi
Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'
1,13	0,60	1,36	1,33	1,85	1,40	1,97
0,94	0,41	1,04	1,01	1,42	1,09	1,35
0,81	0,41	0,95	0,93	1,29	0,98	1,35
0,81	0,42	0,96	0,94	1,31	0,99	1,37
1,01	0,28	0,90	0,84	1,25	1,00	0,87
1,04	0,24	0,84	0,75	1,17	0,95	0,70
1,19	0,21	0,79	0,62	1,11	0,91	0,51
0,88	0,36	0,94	0,92	1,29	1,00	1,18
0,86	0,39	0,97	0,95	1,34	1,08	1,29
0,81	0,36	0,91	0,89	1,26	1,01	1,20
1,01	0,48	1,16	1,14	1,61	1,29	1,58
0,70	0,45	0,90	0,90	1,24	0,97	1,44
0,92	0,34	0,95	0,91	1,32	1,08	1,11
0,78	0,38	0,90	0,89	1,25	0,99	1,25
0,72	0,40	0,88	0,87	1,21	0,96	1,31
0,72	0,34	0,83	0,82	1,15	0,93	1,14
0,71	0,32	0,79	0,78	1,10	0,89	1,05
0,79	0,57	1,06	1,05	1,45	1,10	1,79
1,13	0,85	1,52	1,49	2,05	1,49	2,57
1,20	0,93	1,61	1,58	2,18	1,59	2,76
1,09	0,66	1,36	1,34	1,84	1,37	2,10
0,76	0,39	0,90	0,88	1,22	0,92	1,28
0,86	0,91	1,25	1,22	1,67	1,19	2,37
0,66	0,41	0,85	0,85	1,17	0,94	1,35
0,69	0,66	1,03	1,06	1,43	1,16	1,99
0,77	0,59	1,08	1,10	1,50	1,24	1,90
0,60	0,73	0,95	0,98	1,32	1,05	2,01
0,99	0,40	1,06	1,01	1,41	0,98	1,33
1,07	0,39	1,10	1,05	1,46	1,03	1,29
1,20	0,24	0,90	0,83	1,23	0,91	0,70
1,22	0,26	0,95	0,89	1,29	0,95	0,78
0,94	0,47	1,08	1,02	1,42	0,96	1,48
1,25	0,50	1,32	1,25	1,75	1,20	1,64
0,92	0,35	0,95	0,91	1,26	0,87	1,14
1,30	1,01	1,68	1,57	2,20	1,44	2,76
1,33	0,40	1,23	1,15	1,72	1,41	1,24
0,82	0,30	0,84	0,81	1,17	0,94	0,99
1,12	0,35	1,06	1,00	1,48	1,21	1,11
1,14	0,31	1,00	0,91	1,39	1,15	0,93
0,78	0,44	0,96	0,95	1,32	1,03	1,43
0,78	0,31	0,83	0,81	1,14	0,90	1,01
0,83	0,27	0,80	0,76	1,10	0,88	0,86
0,77	0,32	0,84	0,82	1,15	0,90	1,07
1,28	0,66	1,52	1,50	2,08	1,60	2,18
0,98	0,26	0,85	0,80	1,16	0,88	0,80
1,13	0,31	1,01	0,95	1,37	1,03	0,98
1,29	0,48	1,34	1,29	1,81	1,33	1,61
1,30	0,42	1,26	1,20	1,70	1,27	1,37
1,08	0,32	1,00	0,95	1,35	1,01	1,02
1,02	0,33	0,99	0,95	1,34	1,00	1,10
1,08	0,39	1,10	1,06	1,49	1,10	1,30
1,06	0,26	0,89	0,83	1,22	0,93	0,80
1,92	0,33	1,29	1,11	1,79	1,39	0,86
0,95	0,31	0,92	0,88	1,28	1,04	1,00
1,12	0,30	0,97	0,88	1,36	1,12	0,89
0,91	0,36	0,96	0,93	1,33	1,06	1,17
0,74	0,46	0,94	0,93	1,29	0,99	1,48
0,93	0,46	1,08	1,07	1,49	1,17	1,51
MEDIA	0,98	0,43	1,04	1,00	1,42	1,36
DEVIAZIONE STANDARD	0,23	0,18	0,21	0,21	0,19	0,50

Tabella 18: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm piano interrato





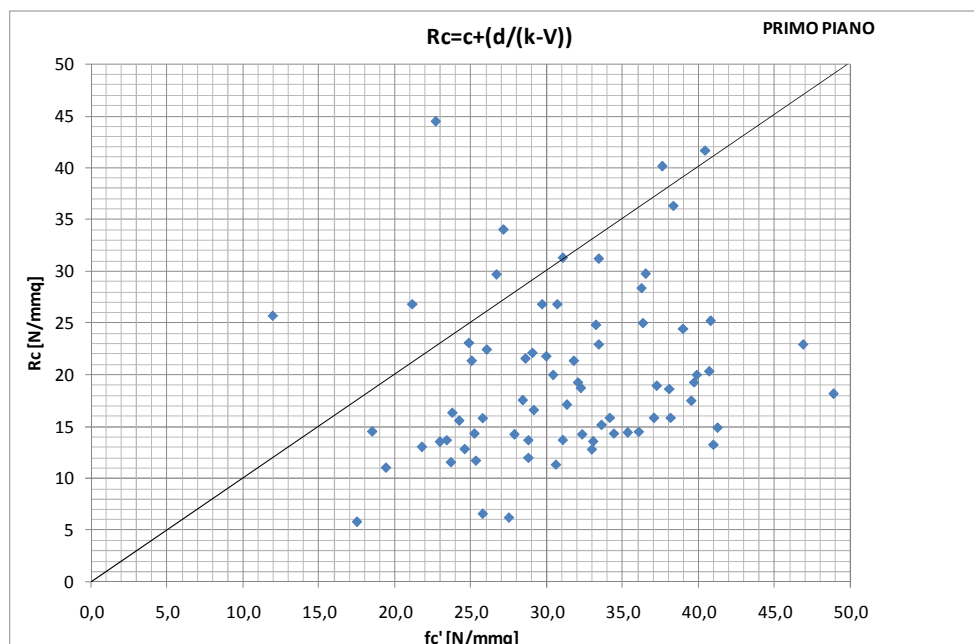
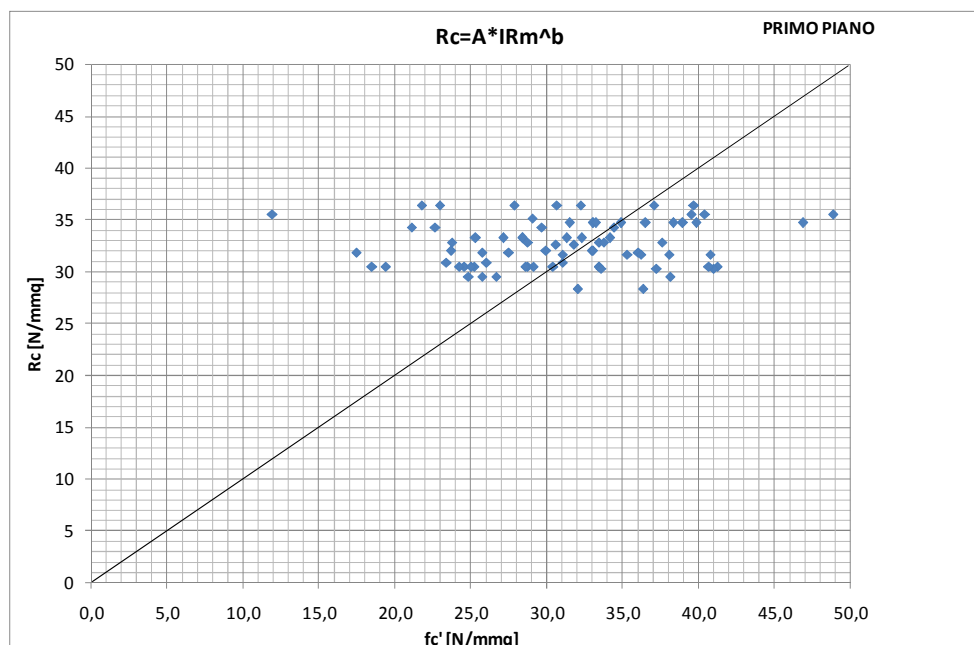


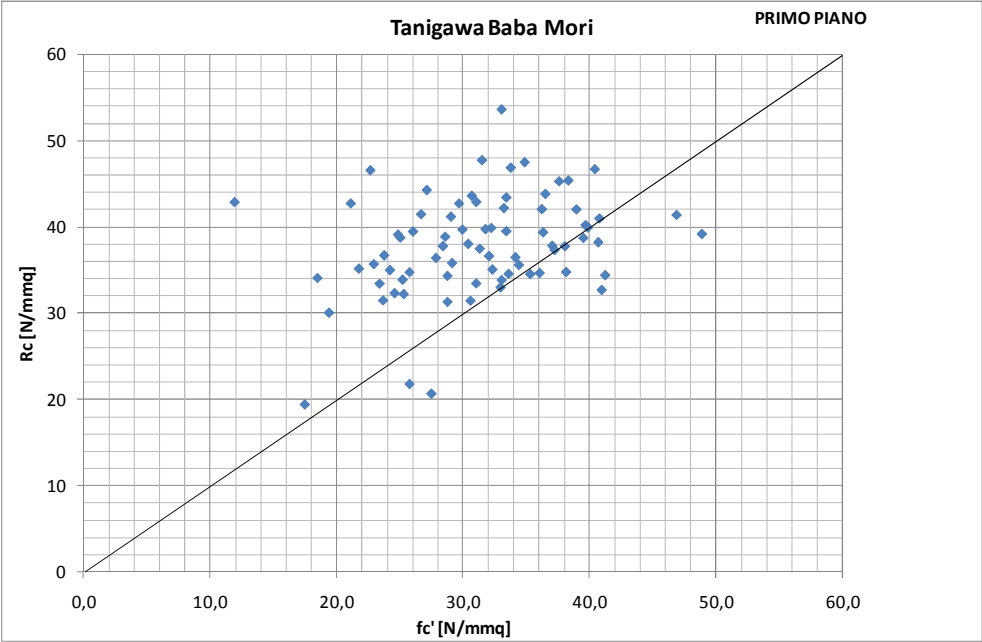
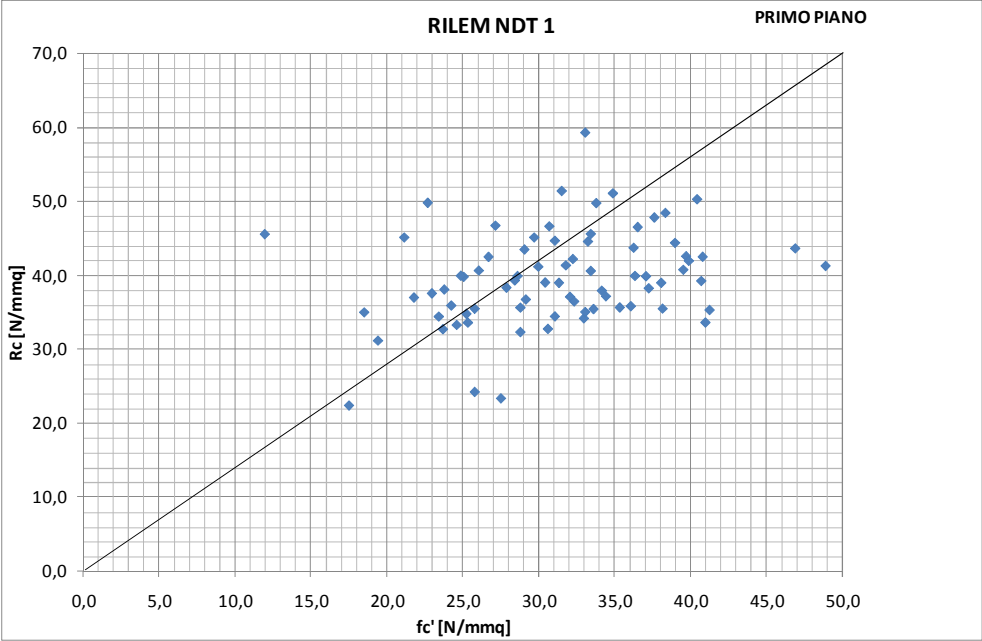


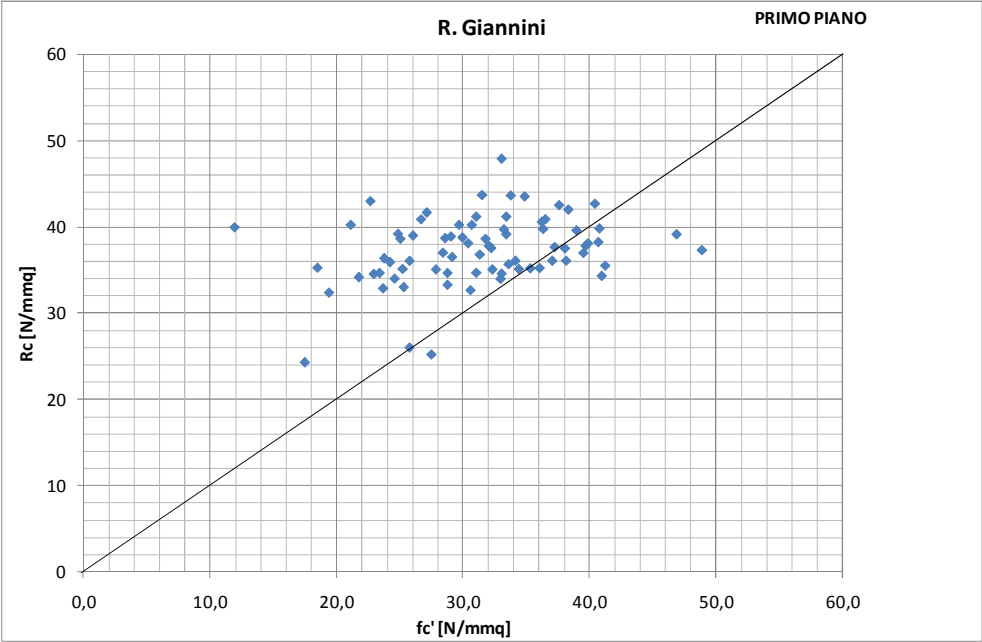
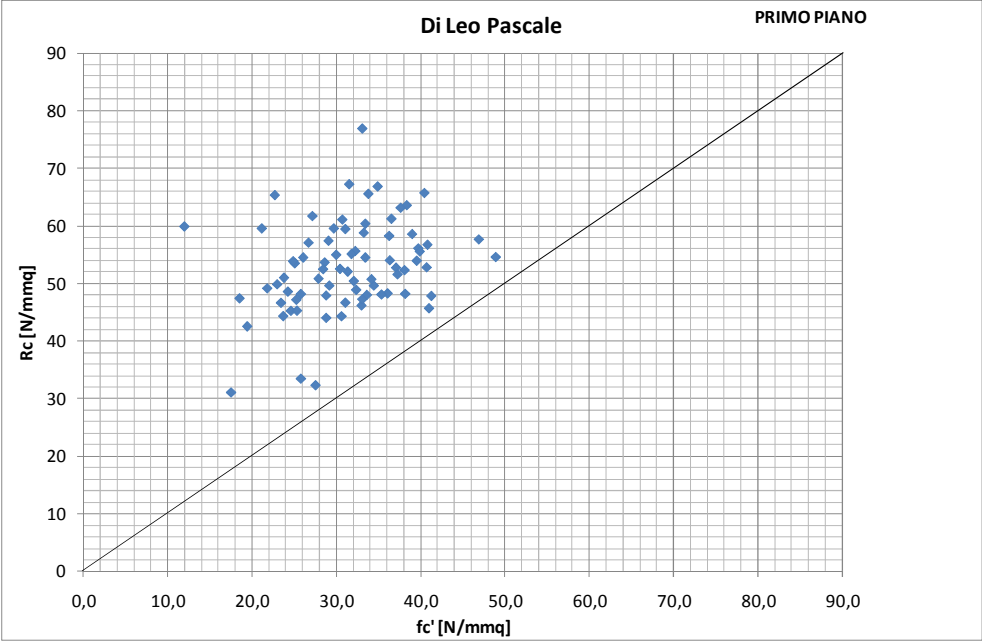
Grafici Carote Ø 32 mm

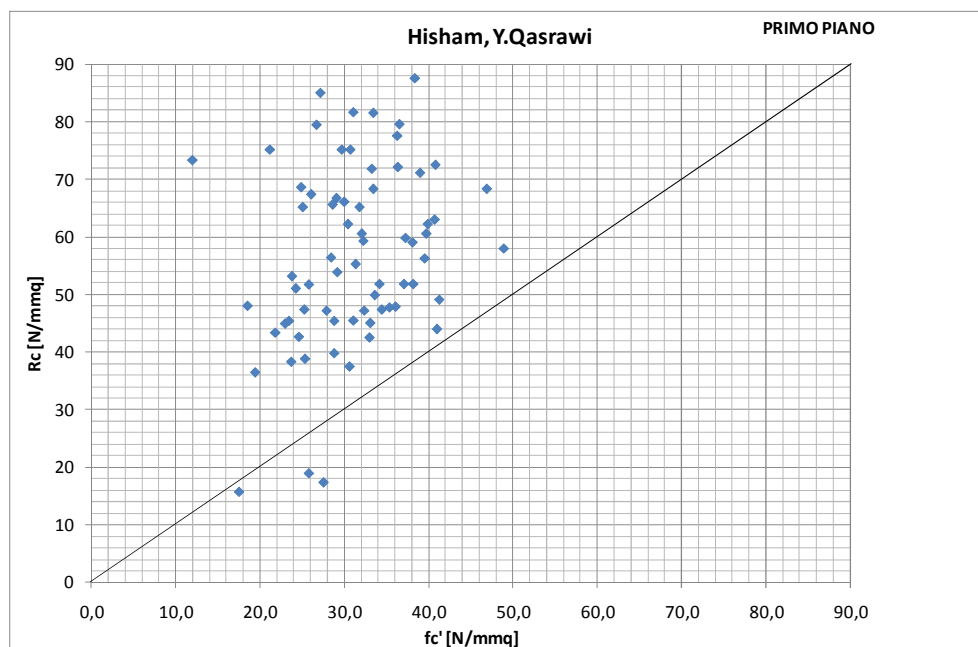
	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'
	0,82	0,52	1,06	1,06	1,45	1,14	1,70
	0,87	0,41	1,00	0,98	1,38	1,11	1,35
	0,88	0,76	1,25	1,25	1,71	1,31	2,27
	0,85	0,43	1,01	1,00	1,39	1,11	1,44
	0,92	0,67	1,24	1,24	1,70	1,32	2,10
	0,79	0,52	1,03	1,03	1,42	1,11	1,68
	1,09	0,45	1,17	1,14	1,63	1,33	1,46
	0,75	0,34	0,85	0,84	1,18	0,95	1,14
	0,88	0,39	0,98	0,95	1,33	1,02	1,29
	0,88	0,48	1,07	1,05	1,45	1,09	1,58
	1,10	0,49	1,23	1,20	1,67	1,28	1,62
	1,19	0,53	1,33	1,30	1,84	1,46	1,75
	1,10	0,41	1,13	1,09	1,59	1,32	1,33
	1,22	0,53	1,35	1,32	1,86	1,46	1,76
	0,94	0,48	1,12	1,10	1,53	1,18	1,60
	0,81	0,71	1,14	1,13	1,54	1,15	2,06
	1,27	0,75	1,59	1,57	2,16	1,65	2,44
	0,94	0,64	1,22	1,21	1,67	1,26	2,00
	0,76	0,39	0,90	0,88	1,23	0,92	1,29
	0,84	0,44	1,00	0,98	1,35	1,01	1,44
	0,97	0,46	1,11	1,08	1,51	1,14	1,51
	1,11	0,58	1,32	1,29	1,79	1,34	1,90
	0,92	0,56	1,15	1,13	1,55	1,14	1,79
	0,72	0,40	0,87	0,85	1,18	0,87	1,29
	1,51	0,66	1,67	1,62	2,26	1,67	2,19
	1,01	0,44	1,12	1,09	1,52	1,12	1,47
	1,02	0,45	1,13	1,10	1,53	1,13	1,49
	1,14	0,50	1,27	1,23	1,71	1,27	1,66
	0,77	0,56	1,03	1,02	1,40	1,06	1,74
	0,88	0,35	0,94	0,91	1,29	1,03	1,15
	1,29	0,34	1,13	1,05	1,55	1,22	1,05
	1,23	0,16	0,66	0,43	0,94	0,75	0,32
	1,03	0,13	0,56	0,36	0,79	0,63	0,27
	0,93	0,29	0,88	0,84	1,20	0,93	0,92
	1,30	0,43	1,28	1,22	1,74	1,33	1,41
	1,03	1,45	1,56	1,50	2,07	1,43	3,14
	1,10	0,30	0,97	0,91	1,33	1,04	0,93
	1,12	0,63	1,36	1,32	1,83	1,34	2,03
	1,11	0,36	1,08	1,04	1,48	1,13	1,19
	0,92	0,48	1,10	1,09	1,52	1,21	1,60
	0,70	0,34	0,81	0,80	1,11	0,84	1,13
	0,82	0,36	0,91	0,89	1,24	0,95	1,19
	0,81	0,45	0,99	0,97	1,35	1,03	1,47
	1,13	0,46	1,21	1,18	1,69	1,40	1,49
	1,26	0,82	1,64	1,64	2,26	1,79	2,64
	0,98	0,97	1,45	1,46	1,98	1,52	2,78
	1,00	0,38	1,04	1,01	1,45	1,17	1,25
	1,14	0,41	1,15	1,10	1,60	1,31	1,30
	1,13	0,45	1,20	1,16	1,66	1,35	1,46
	1,05	0,53	1,24	1,23	1,71	1,35	1,77
	1,24	0,77	1,57	1,56	2,14	1,62	2,47
	0,91	0,52	1,13	1,12	1,55	1,22	1,70
	0,84	0,41	0,97	0,96	1,34	1,07	1,34
MEDIA	1,00	0,50	1,14	1,10	1,55	1,20	1,59
DEVIAZIONE STANDARD	0,18	0,20	0,23	0,25	0,31	0,23	0,53

Tabella 19: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm piano terra





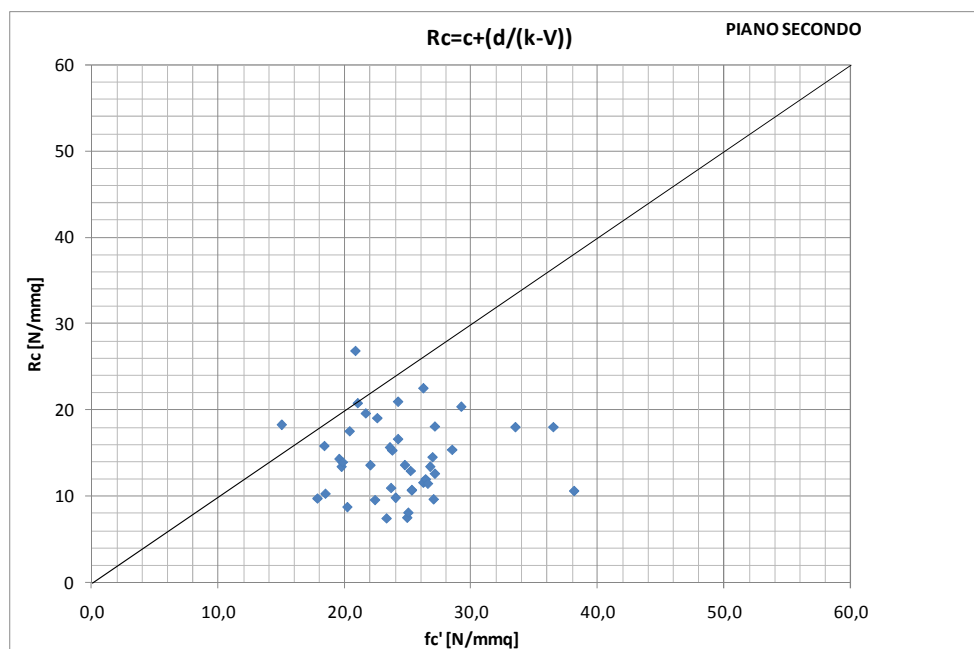
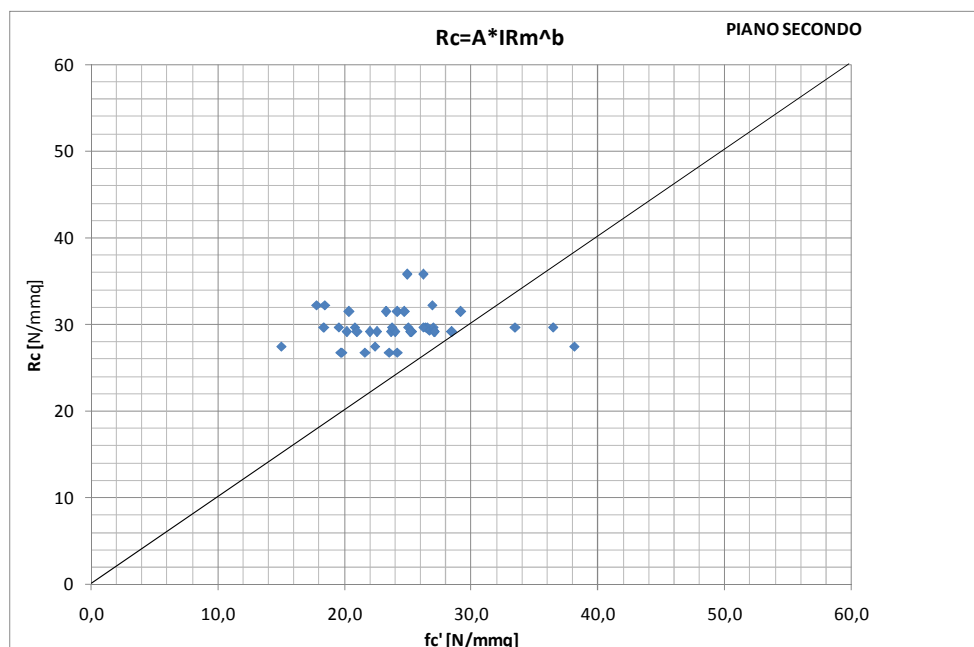


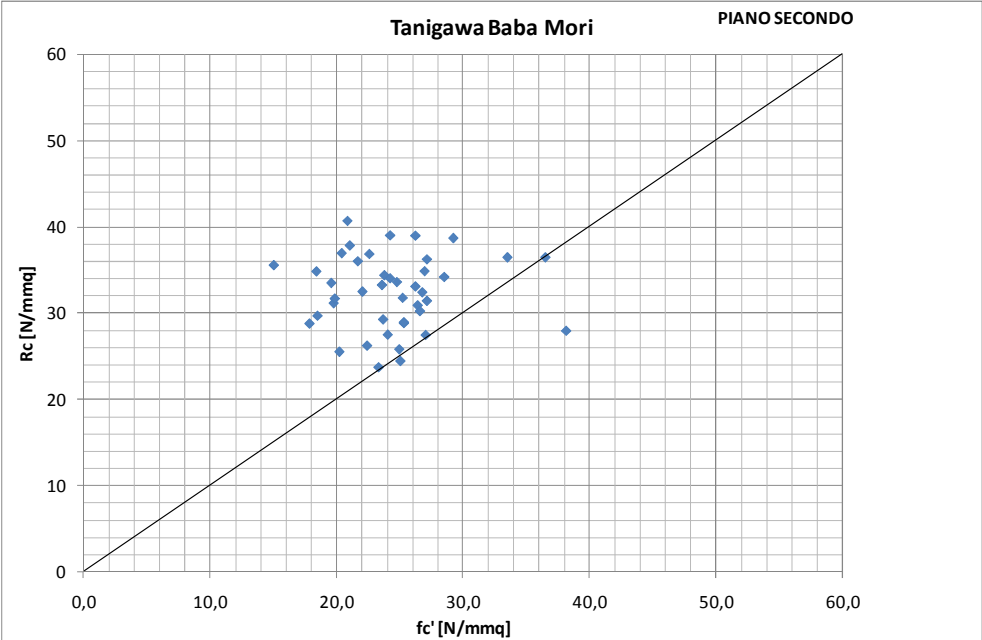
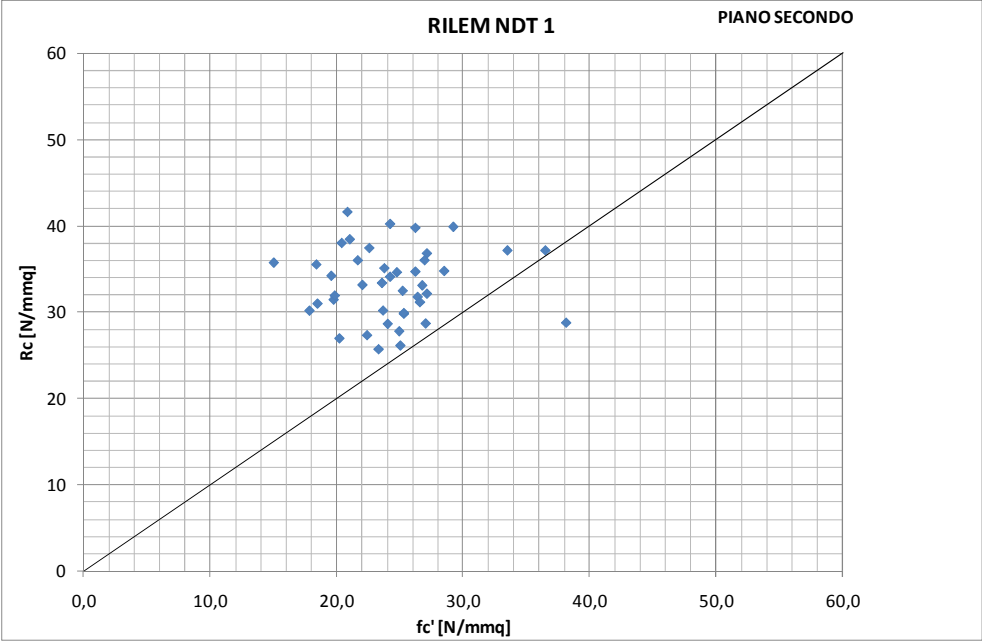


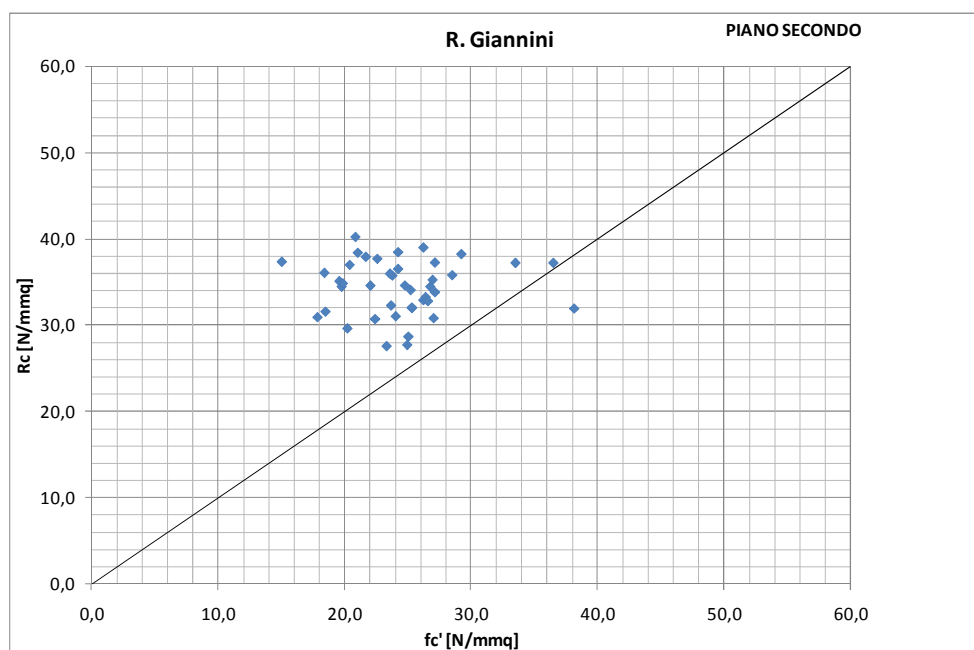
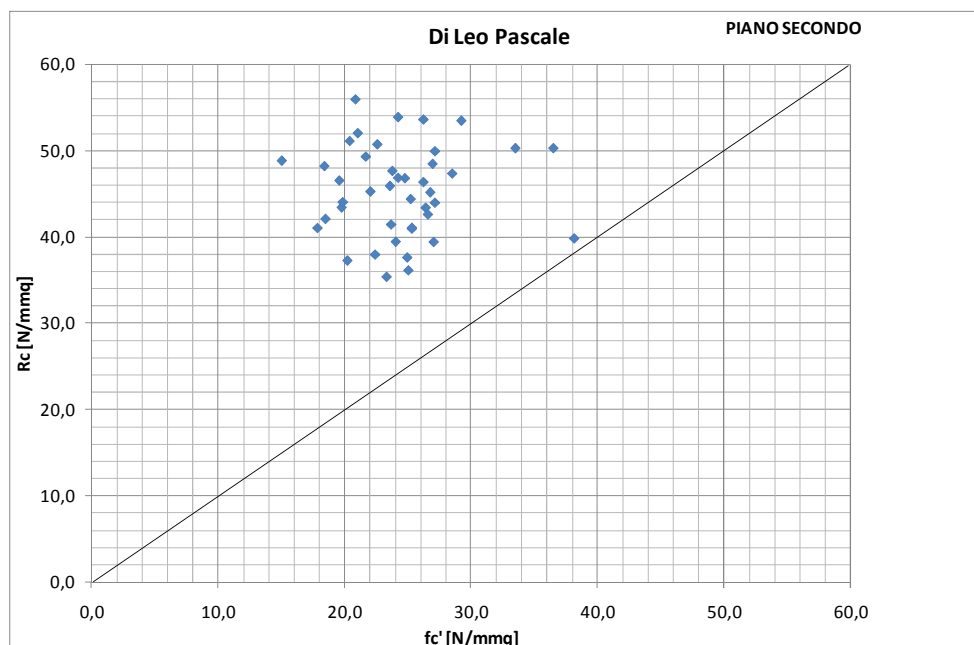
Grafici Carote Ø 32 mm

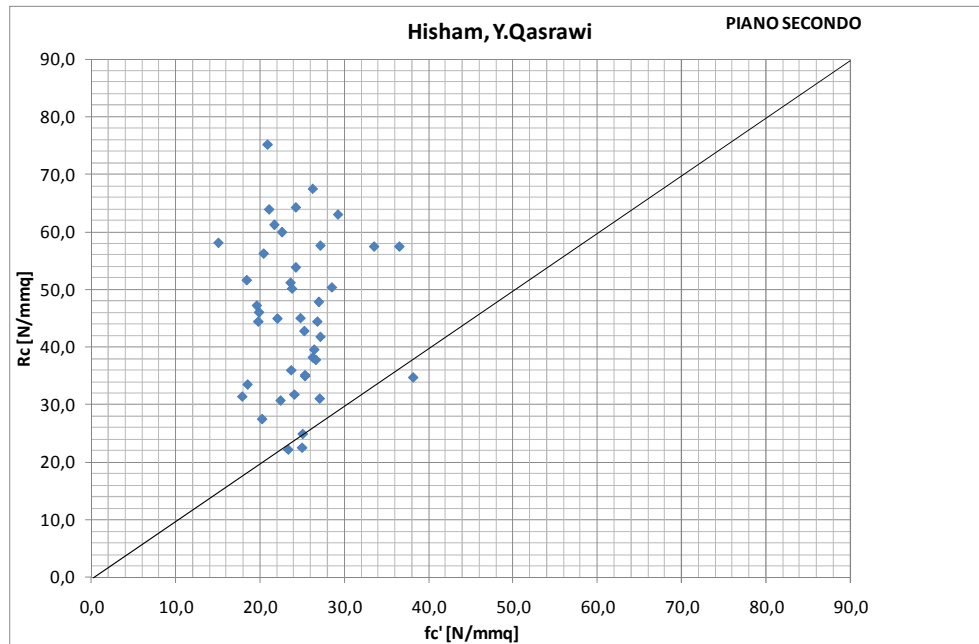
INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA' ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y. Qasrawi
Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'
0,88	0,40	0,99	0,96	1,34	0,98	1,33
1,24	0,26	0,94	0,85	1,30	1,01	0,73
1,16	0,23	0,85	0,75	1,17	0,92	0,63
1,82	0,33	1,28	1,11	1,78	1,39	0,90
1,24	0,52	1,35	1,32	1,84	1,38	1,74
1,00	0,66	1,28	1,25	1,73	1,25	2,05
1,05	0,57	1,26	1,23	1,70	1,25	1,85
1,21	0,57	1,38	1,34	1,87	1,39	1,88
1,57	0,57	1,61	1,55	2,19	1,67	1,88
0,91	0,69	1,22	1,18	1,63	1,17	2,05
0,74	0,36	0,86	0,83	1,16	0,86	1,19
1,06	0,42	1,12	1,09	1,53	1,16	1,38
1,19	0,88	1,52	1,42	1,99	1,31	2,45
0,92	0,49	1,07	1,01	1,41	0,95	1,53
1,67	0,60	1,70	1,62	2,26	1,57	1,99
0,98	0,43	1,08	1,02	1,42	0,97	1,40
1,31	0,51	1,38	1,31	1,82	1,26	1,69
1,59	0,59	1,64	1,56	2,17	1,51	1,96
1,13	0,58	1,31	1,24	1,73	1,17	1,84
1,21	0,76	1,50	1,42	1,98	1,34	2,30
0,74	0,32	0,82	0,80	1,11	0,84	1,07
0,90	0,45	1,06	1,03	1,43	1,06	1,49
0,81	0,51	1,03	1,00	1,38	1,01	1,61
1,22	0,85	1,59	1,55	2,14	1,54	2,61
0,75	0,50	0,96	0,94	1,30	0,94	1,55
0,89	0,60	1,16	1,14	1,57	1,18	1,89
0,78	0,69	1,10	1,08	1,49	1,10	1,99
1,32	0,59	1,47	1,43	1,99	1,48	1,94
0,99	0,44	1,11	1,08	1,50	1,12	1,47
1,19	0,86	1,56	1,52	2,09	1,50	2,59
0,77	0,42	0,93	0,91	1,26	0,95	1,36
1,15	0,62	1,38	1,35	1,87	1,40	2,01
1,19	0,93	1,61	1,58	2,17	1,58	2,76
1,11	1,11	1,59	1,56	2,14	1,53	2,98
1,10	1,68	1,63	1,52	2,14	1,39	3,21
1,05	-75,50	1,80	1,62	2,33	1,45	4,29
0,89	0,63	1,14	1,08	1,50	1,02	1,83
0,95	0,82	1,28	1,20	1,68	1,12	2,18
0,74	0,49	0,93	0,88	1,23	0,84	1,46
0,87	0,50	1,05	1,00	1,39	0,96	1,56
1,00	1,45	1,47	1,36	1,92	1,25	2,85
0,91	0,95	1,26	1,19	1,66	1,10	2,29
1,05	0,75	1,34	1,27	1,77	1,20	2,16
1,02	1,01	1,44	1,38	1,92	1,33	2,63
0,78	0,62	1,04	1,01	1,39	0,98	1,78
0,87	0,78	1,21	1,16	1,61	1,12	2,14
0,83	0,49	1,02	0,99	1,37	0,99	1,55
0,90	0,41	1,01	0,98	1,36	1,00	1,35
1,00	0,42	1,08	1,03	1,44	1,02	1,38
1,62	1,27	2,14	2,02	2,82	1,91	3,56
1,51	1,96	2,20	2,06	2,88	1,90	4,20
1,16	0,90	1,52	1,44	2,01	1,36	2,54
1,38	0,69	1,60	1,55	2,15	1,53	2,24
0,98	0,94	1,37	1,30	1,81	1,23	2,44
0,73	0,37	0,84	0,80	1,12	0,76	1,19
0,88	1,03	1,24	1,16	1,63	1,06	2,30
0,90	0,44	1,03	0,98	1,37	0,94	1,43
2,98	2,16	3,82	3,60	5,02	3,35	6,16
1,07	0,76	1,40	1,36	1,88	1,35	2,30
1,65	0,79	1,89	1,85	2,57	1,91	2,60
1,26	0,64	1,48	1,45	2,01	1,48	2,11
1,07	0,73	1,37	1,33	1,84	1,30	2,21
0,97	0,39	1,04	1,00	1,40	1,03	1,29
0,97	0,41	1,06	1,02	1,43	1,05	1,36
1,35	0,49	1,38	1,33	1,87	1,39	1,62
1,03	0,67	1,30	1,25	1,73	1,22	2,05
1,07	0,37	1,07	1,03	1,45	1,07	1,23
1,06	0,55	1,25	1,20	1,66	1,18	1,77
1,32	0,46	1,33	1,27	1,79	1,31	1,54
0,97	0,47	1,11	1,07	1,49	1,06	1,52
1,17	0,62	1,38	1,33	1,85	1,30	1,99
1,03	0,44	1,13	1,09	1,51	1,09	1,46
1,23	1,26	1,72	1,63	2,27	1,54	3,14
1,14	0,48	1,24	1,19	1,66	1,21	1,58
0,87	1,07	1,27	1,21	1,68	1,13	2,43
0,97	1,55	1,47	1,39	1,94	1,29	2,98
MEDIA	1,11	-0,31	1,33	1,27	1,78	2,03
DEVIAZIONE STANDARD	0,32	8,75	0,41	0,38	0,53	0,84

Tabella 20: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm primo piano





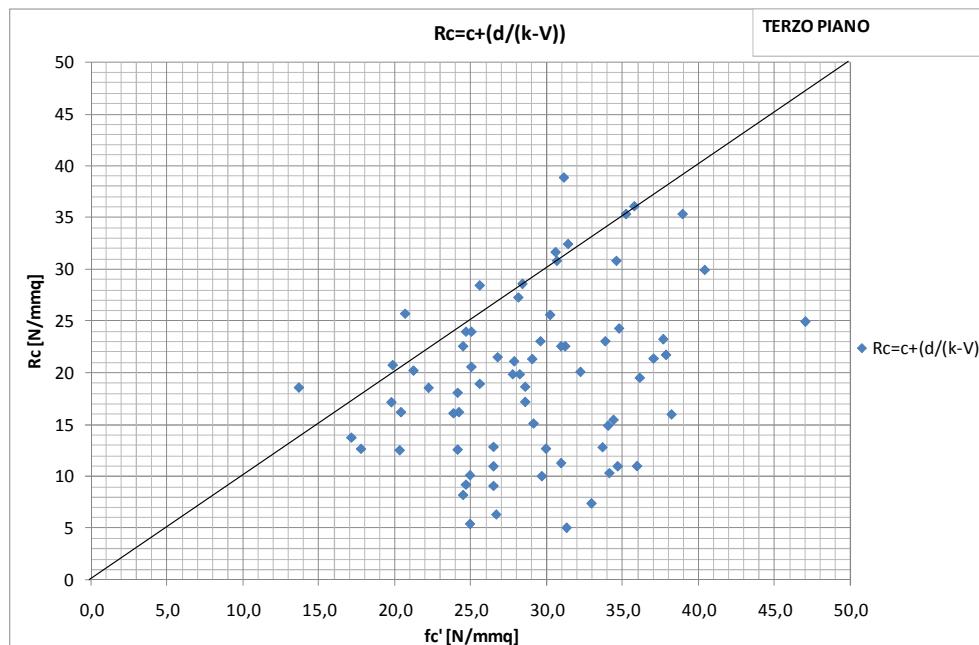
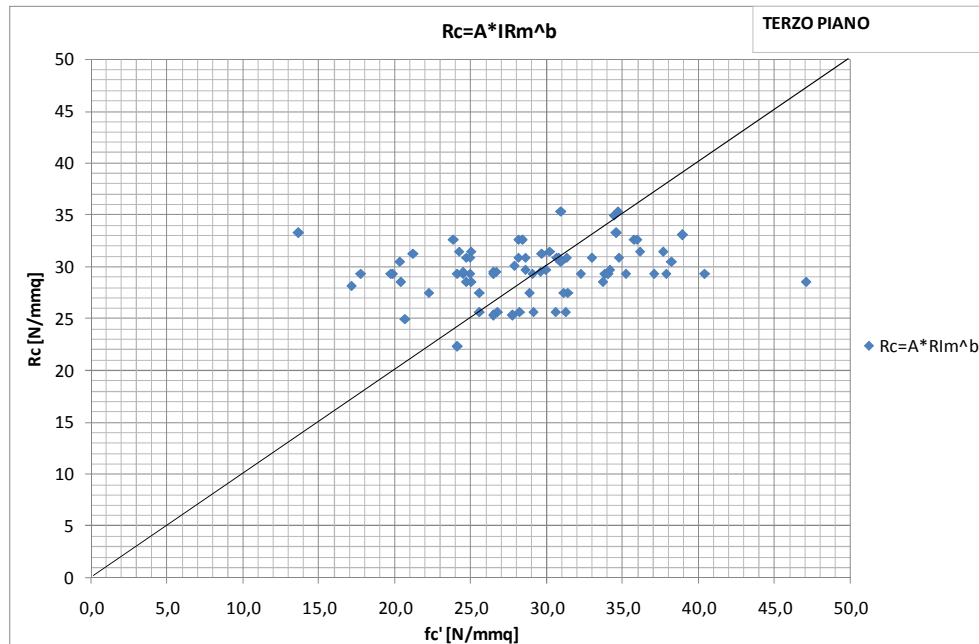


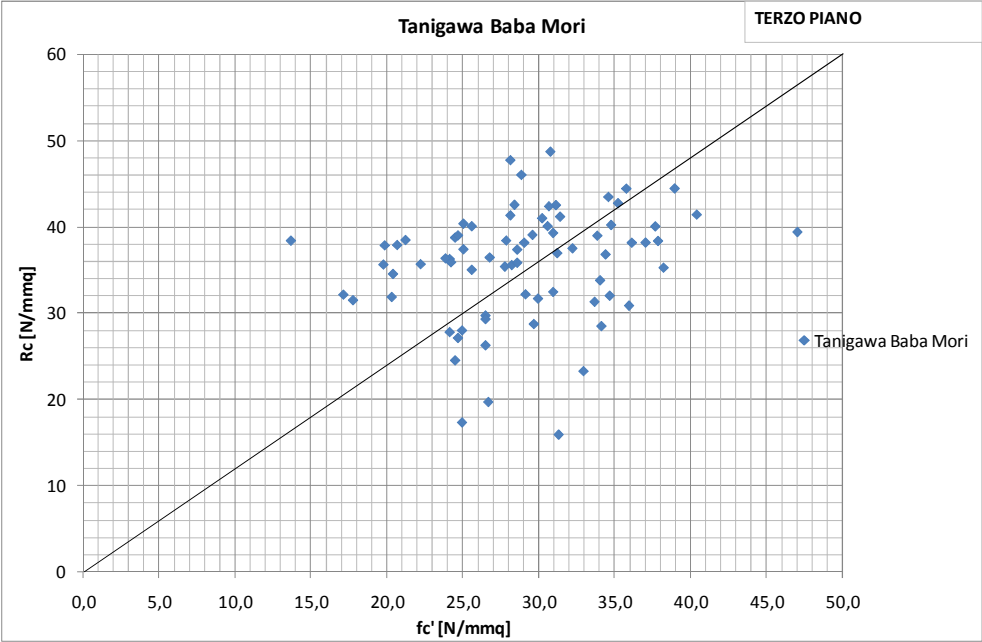
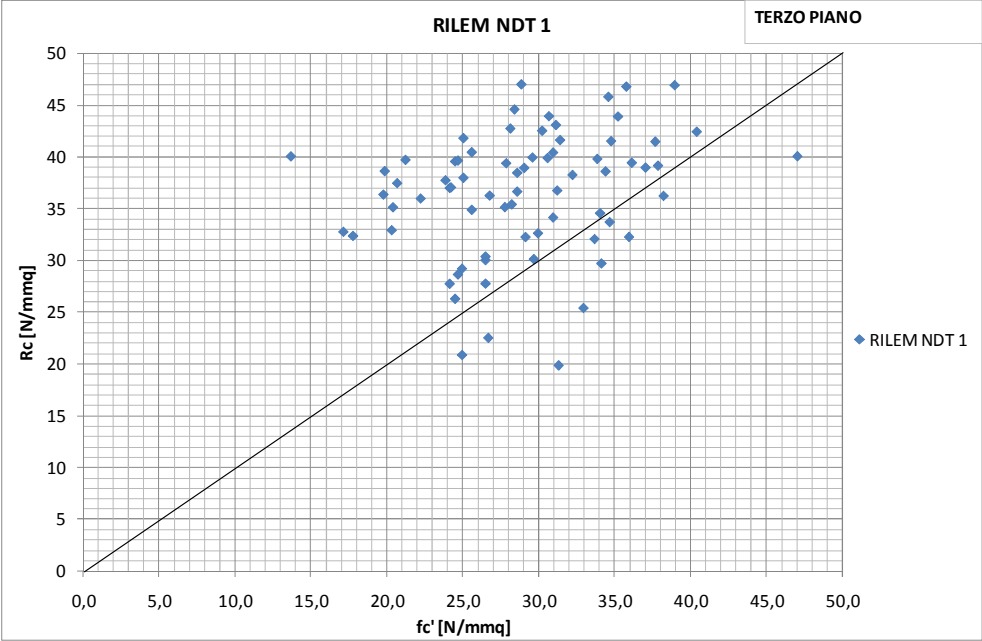


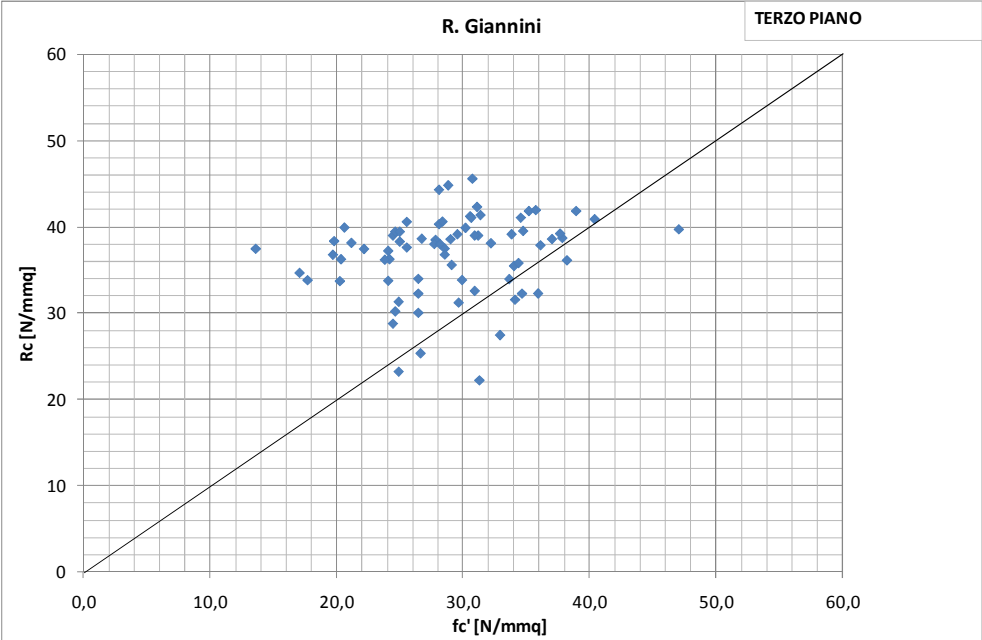
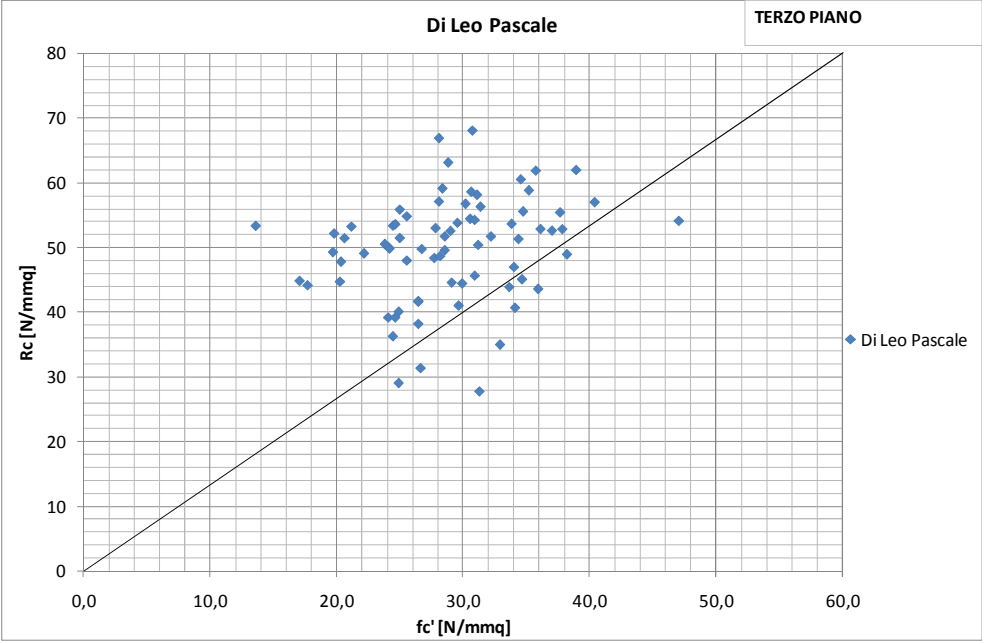
Grafici Carote Ø 32 mm

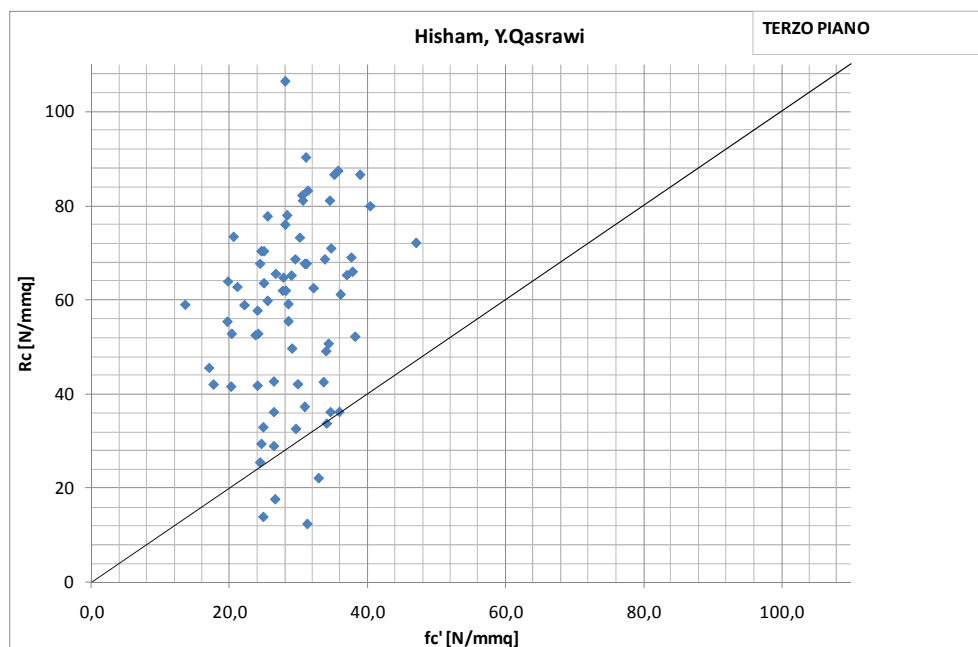
INDICE DI RIMBALZO	VELOCITÀ ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y. Qasrawi
Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'
1,44	0,43	1,34	1,26	1,85	1,47	1,36
1,23	0,46	1,28	1,24	1,75	1,36	1,52
1,15	0,42	1,18	1,14	1,62	1,26	1,38
1,21	0,41	1,19	1,14	1,64	1,29	1,32
1,15	0,42	1,18	1,14	1,62	1,27	1,39
1,44	0,30	1,12	1,03	1,51	1,11	0,91
1,37	0,44	1,33	1,26	1,77	1,25	1,46
1,08	0,70	1,37	1,32	1,83	1,31	2,16
1,30	0,87	1,66	1,61	2,23	1,59	2,66
1,35	0,32	1,11	1,02	1,52	1,18	0,95
1,54	0,86	1,87	1,81	2,51	1,81	2,76
1,27	0,55	1,40	1,36	1,89	1,40	1,82
1,10	0,50	1,24	1,21	1,69	1,29	1,66
1,62	0,86	1,94	1,89	2,62	1,96	2,81
1,13	0,45	1,21	1,17	1,65	1,26	1,50
1,12	0,43	1,17	1,14	1,60	1,23	1,42
1,25	0,64	1,48	1,45	2,01	1,50	2,11
0,81	0,49	1,02	1,00	1,38	1,02	1,58
1,10	0,36	1,06	1,02	1,46	1,14	1,15
0,89	0,54	1,11	1,09	1,50	1,11	1,72
1,52	0,73	1,75	1,71	2,38	1,79	2,42
1,13	0,86	1,52	1,49	2,05	1,49	2,58
1,19	0,32	1,05	0,98	1,45	1,14	1,00
1,43	1,29	2,00	1,95	2,69	1,93	3,61
1,35	0,68	1,60	1,58	2,20	1,74	2,25
1,13	0,66	1,42	1,41	1,95	1,53	2,17
1,10	0,69	1,41	1,41	1,94	1,51	2,23
1,35	0,70	1,61	1,60	2,22	1,76	2,32
1,23	0,91	1,66	1,66	2,28	1,75	2,83
1,39	0,99	1,83	1,80	2,48	1,83	3,04
1,07	0,47	1,19	1,16	1,62	1,25	1,54
1,32	0,62	1,51	1,48	2,06	1,57	2,04
1,29	0,84	1,66	1,63	2,25	1,67	2,66
1,16	0,51	1,29	1,26	1,76	1,35	1,70
1,02	0,54	1,22	1,20	1,66	1,26	1,77
1,07	0,67	1,36	1,34	1,84	1,37	2,13
1,81	0,55	1,69	1,61	2,30	1,73	1,76
1,20	0,54	1,34	1,29	1,80	1,31	1,78
1,75	0,56	1,68	1,61	2,28	1,71	1,82
1,23	0,43	1,22	1,17	1,70	1,37	1,37
0,72	0,28	0,76	0,73	1,05	0,84	0,91
1,83	1,22	2,38	2,37	3,26	2,49	3,87
MEDIA	1,26	1,41	1,37	1,93	1,46	1,94
DEVIAZIONE STANDARD	0,24	0,23	0,32	0,42	0,31	0,70

Tabella 21: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm secondo piano





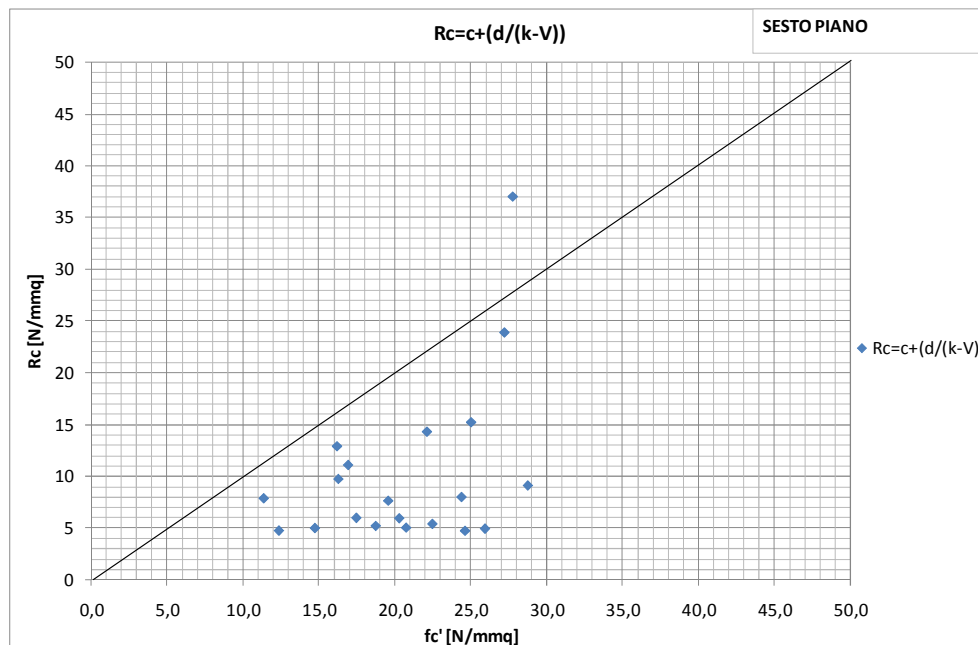
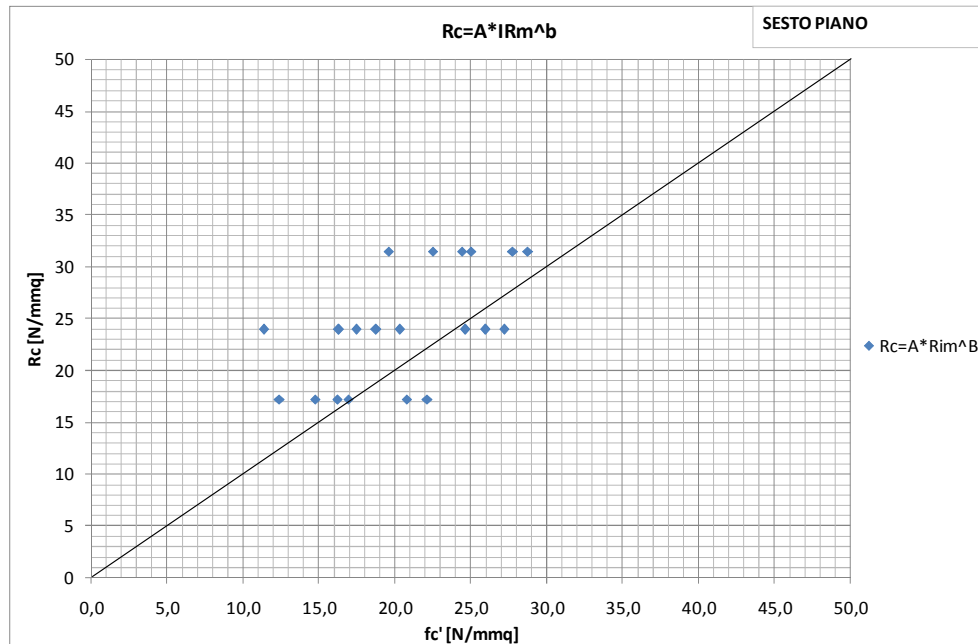


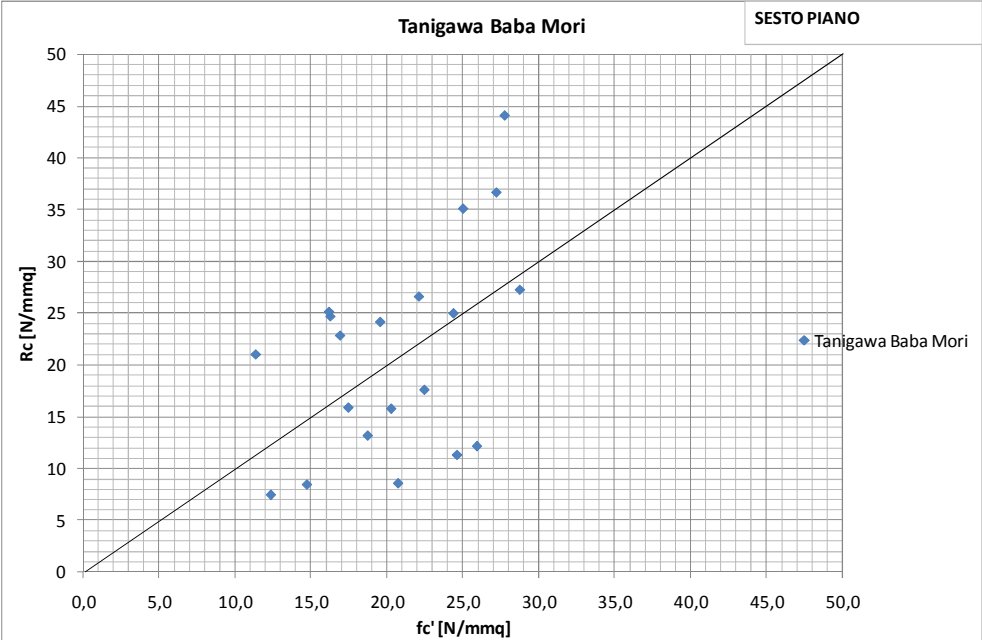
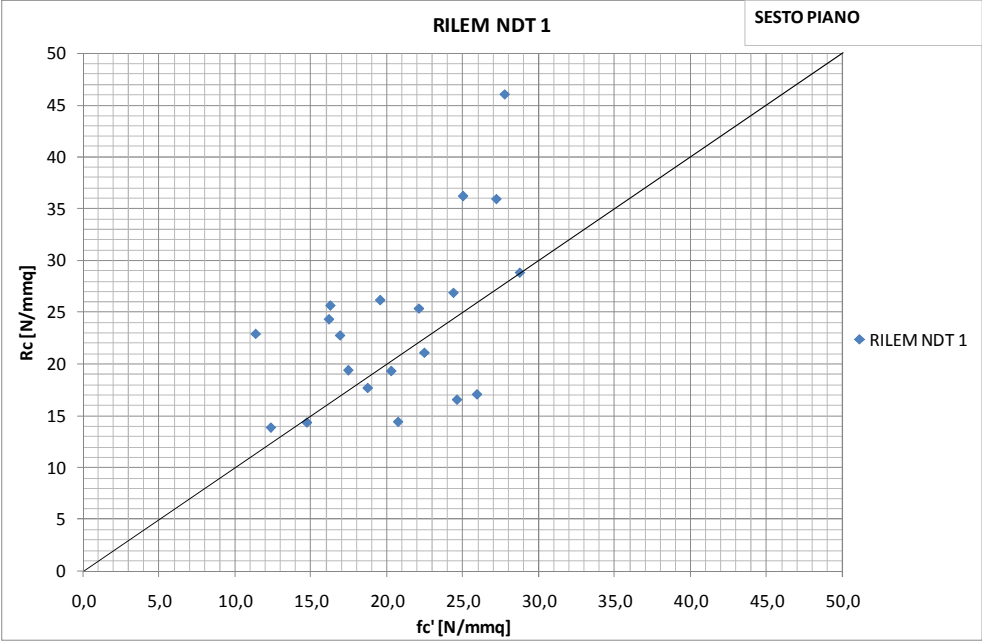


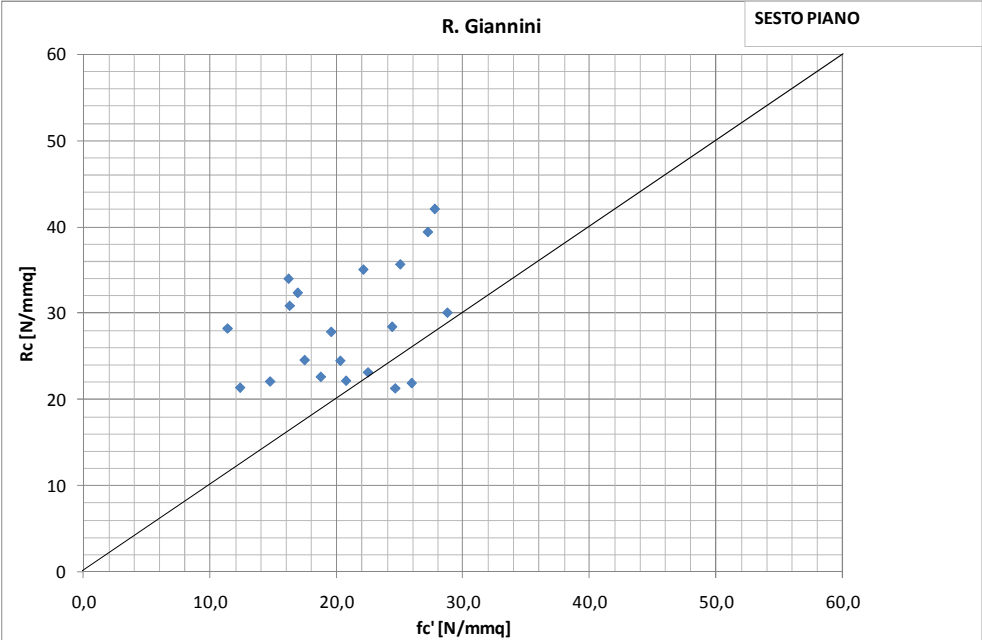
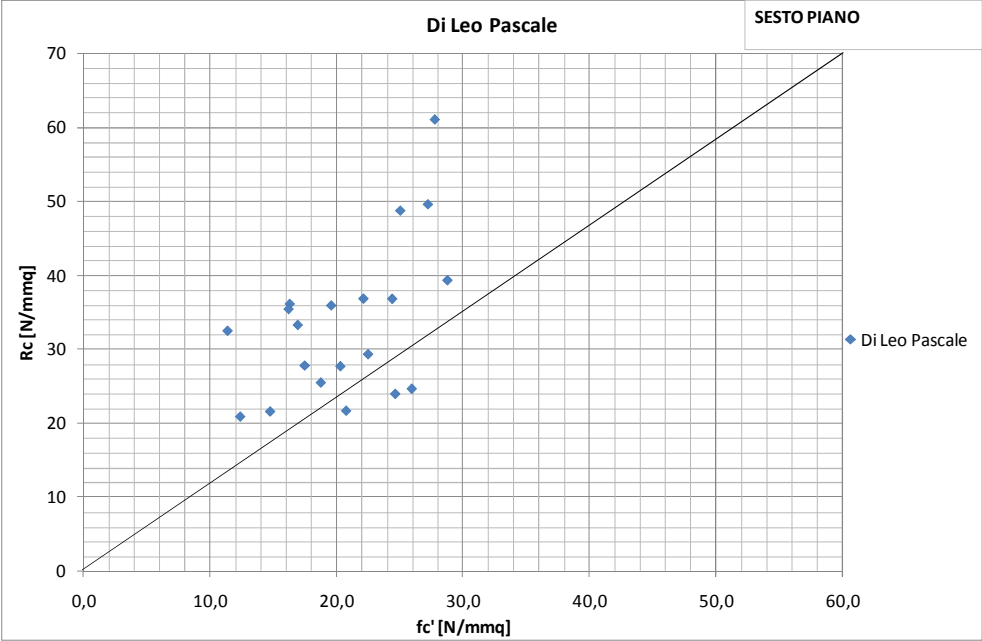
Grafici Carote Ø 32 mm

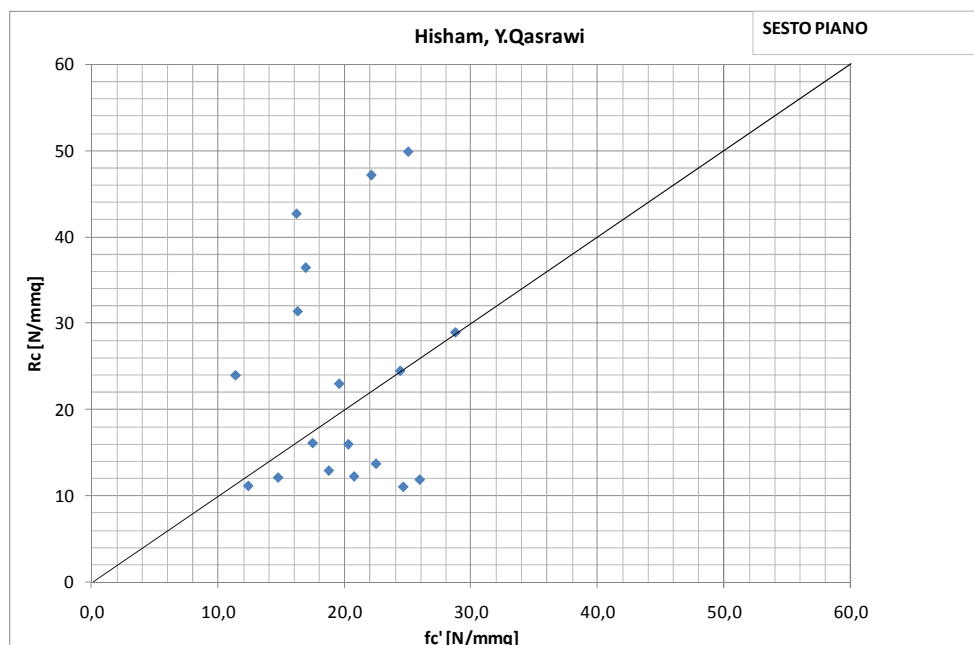
INDICE DI RIMBALZO	VELOCITÀ ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y. Qasrawi
Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'	Rc/fc'
1,14	0,82	1,52	1,50	2,06	1,53	2,54
1,22	0,75	1,53	1,51	2,08	1,54	2,39
1,65	0,80	1,91	1,88	2,62	2,03	2,66
0,87	1,03	1,33	1,31	1,79	1,32	2,65
0,88	1,25	1,38	1,37	1,87	1,36	2,90
1,07	1,11	1,58	1,57	2,14	1,59	3,04
1,24	0,84	1,62	1,61	2,21	1,69	2,65
0,95	2,61	1,63	1,60	2,19	1,55	3,85
0,96	0,80	1,35	1,36	1,86	1,45	2,45
1,00	0,74	1,36	1,37	1,88	1,47	2,34
1,48	1,05	1,95	1,91	2,63	1,93	3,22
1,65	0,71	1,82	1,78	2,49	1,91	2,36
1,18	0,41	1,17	1,12	1,61	1,26	1,32
0,91	0,62	1,19	1,17	1,60	1,18	1,94
0,83	1,00	1,25	1,21	1,67	1,19	2,46
1,48	0,87	1,84	1,81	2,50	1,86	2,80
1,01	0,74	1,34	1,32	1,81	1,33	2,24
0,77	0,57	1,03	1,01	1,40	1,02	1,74
0,87	0,68	1,18	1,15	1,59	1,16	2,03
0,86	0,44	1,02	0,99	1,38	1,04	1,44
0,73	0,74	1,05	1,03	1,41	1,01	1,98
0,79	0,58	1,05	1,03	1,42	1,04	1,76
1,08	0,76	1,41	1,38	1,90	1,38	2,32
1,20	0,92	1,62	1,59	2,18	1,59	2,76
0,61	0,53	0,85	0,84	1,15	0,84	1,53
1,16	0,97	1,61	1,58	2,17	1,60	2,85
0,85	0,38	0,95	0,93	1,30	1,01	1,26
1,40	0,79	1,72	1,70	2,35	1,78	2,59
0,93	0,52	1,15	1,16	1,63	1,40	1,73
0,96	0,49	1,13	1,12	1,58	1,28	1,61
0,91	0,72	1,27	1,28	1,74	1,37	2,23
1,00	0,78	1,35	1,32	1,82	1,32	2,32
1,21	0,33	1,07	1,00	1,48	1,18	1,04
1,11	0,34	1,05	0,99	1,44	1,14	1,09
0,87	0,54	1,09	1,06	1,46	1,05	1,69
1,30	0,67	1,53	1,48	2,06	1,50	2,18
1,04	0,85	1,41	1,36	1,88	1,32	2,42
1,26	0,96	1,67	1,61	2,23	1,58	2,81
0,83	0,62	1,10	1,06	1,47	1,04	1,83
1,11	0,24	0,84	0,74	1,18	0,95	0,66
1,11	0,41	1,15	1,11	1,57	1,22	1,36
1,02	0,45	1,12	1,07	1,49	1,04	1,47
1,02	0,32	0,97	0,92	1,30	0,93	1,04
1,14	0,36	1,10	1,05	1,48	1,05	1,20
0,84	1,04	1,30	1,31	1,78	1,35	2,69
0,88	0,52	1,11	1,11	1,53	1,22	1,70
1,21	1,25	1,81	1,84	2,49	1,93	3,55
0,82	0,72	1,18	1,19	1,61	1,25	2,17
0,91	0,70	1,25	1,26	1,73	1,35	2,19
0,85	0,91	1,20	1,14	1,59	1,07	2,22
0,96	0,89	1,32	1,26	1,75	1,19	2,34
2,44	1,36	2,93	2,82	3,91	2,75	4,32
1,47	0,95	1,87	1,82	2,51	1,80	2,96
1,05	0,34	1,02	0,97	1,38	1,05	1,10
0,94	0,22	0,77	0,71	1,06	0,83	0,67
0,99	0,16	0,63	0,51	0,89	0,71	0,39
1,25	0,37	1,16	1,10	1,59	1,23	1,19
1,24	0,22	0,84	0,70	1,17	0,93	0,55
1,10	0,97	1,52	1,47	2,03	1,43	2,70
1,01	1,01	1,43	1,38	1,91	1,34	2,64
1,00	3,36	1,67	1,59	2,21	1,48	3,85
0,89	0,70	1,19	1,16	1,60	1,14	2,04
1,08	0,65	1,35	1,31	1,81	1,31	2,07
0,91	1,01	1,31	1,24	1,73	1,17	2,44
1,16	2,26	1,81	1,70	2,38	1,58	3,79
1,37	0,68	1,58	1,53	2,12	1,52	2,20
1,15	1,01	1,57	1,50	2,08	1,43	2,75
0,91	0,31	0,90	0,86	1,21	0,90	1,01
0,99	0,42	1,09	1,06	1,48	1,13	1,40
1,04	0,60	1,28	1,26	1,74	1,29	1,94
0,87	0,30	0,87	0,84	1,19	0,93	0,99
1,50	0,62	1,62	1,57	2,20	1,66	2,05
0,98	0,73	1,31	1,27	1,75	1,26	2,19
0,80	0,42	0,95	0,92	1,28	0,95	1,36
MEDIA	1,07	1,33	1,29	1,79	1,33	2,11
DEVIAZIONE STANDARD	0,27	0,50	0,36	0,35	0,47	0,81

Tabella 22: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm terzo piano



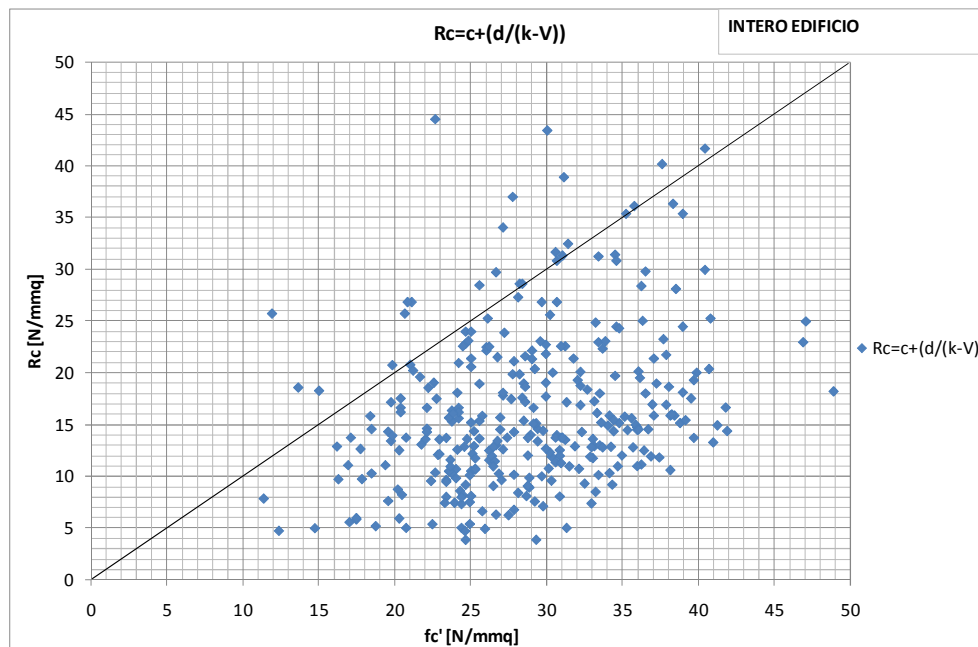
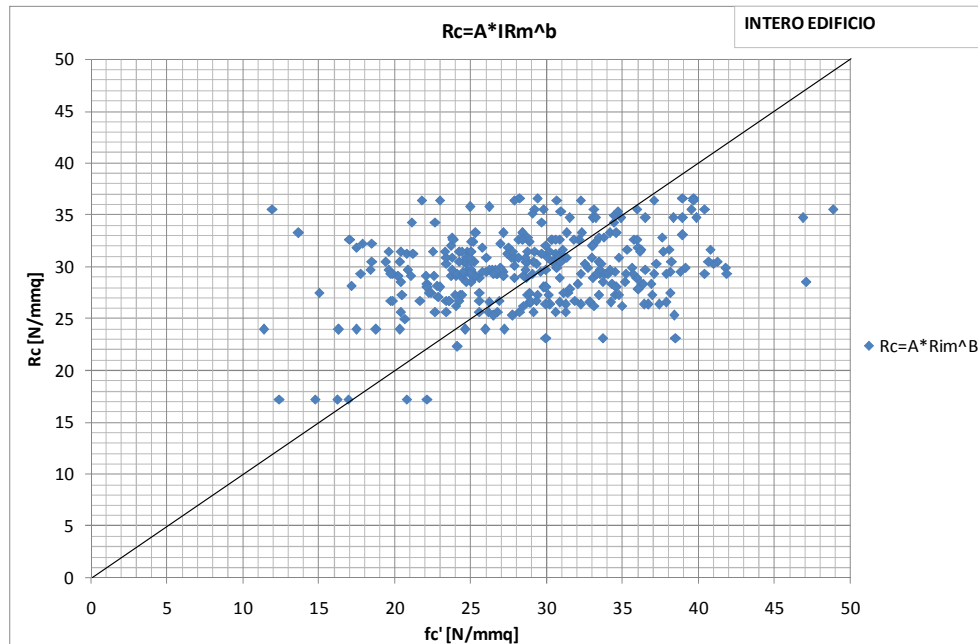


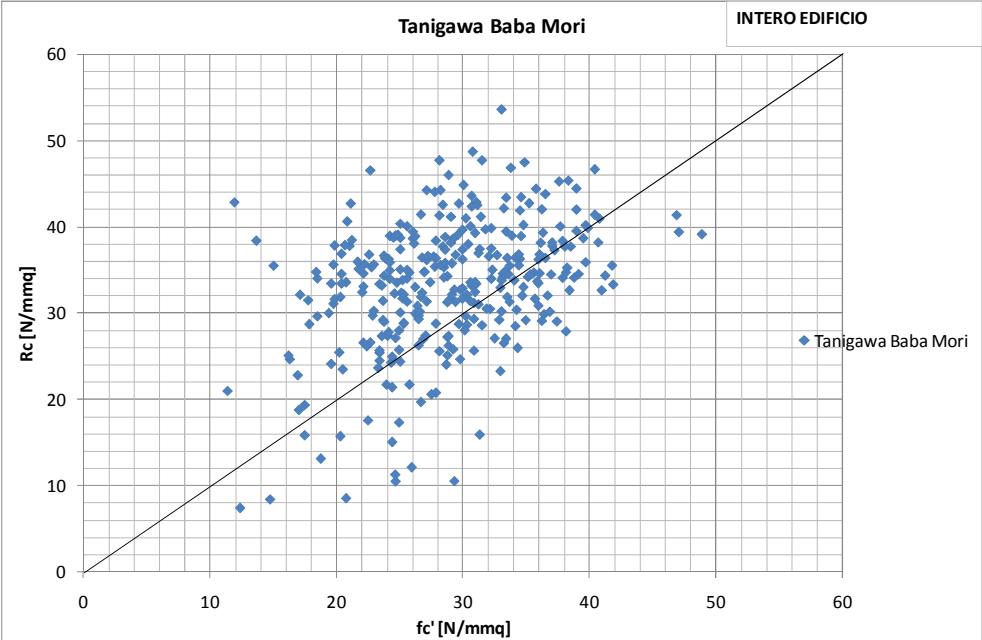
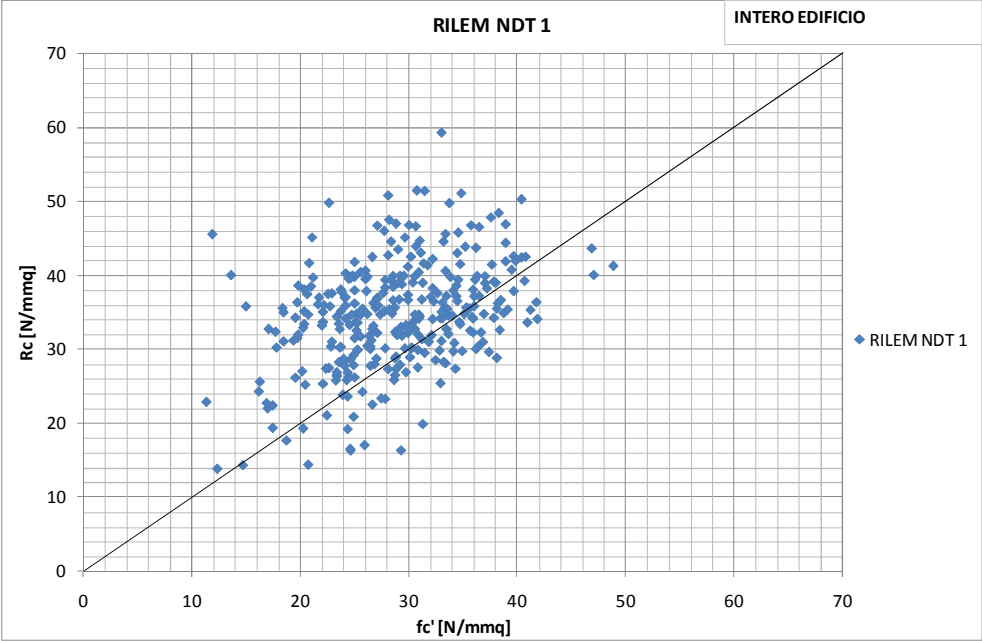


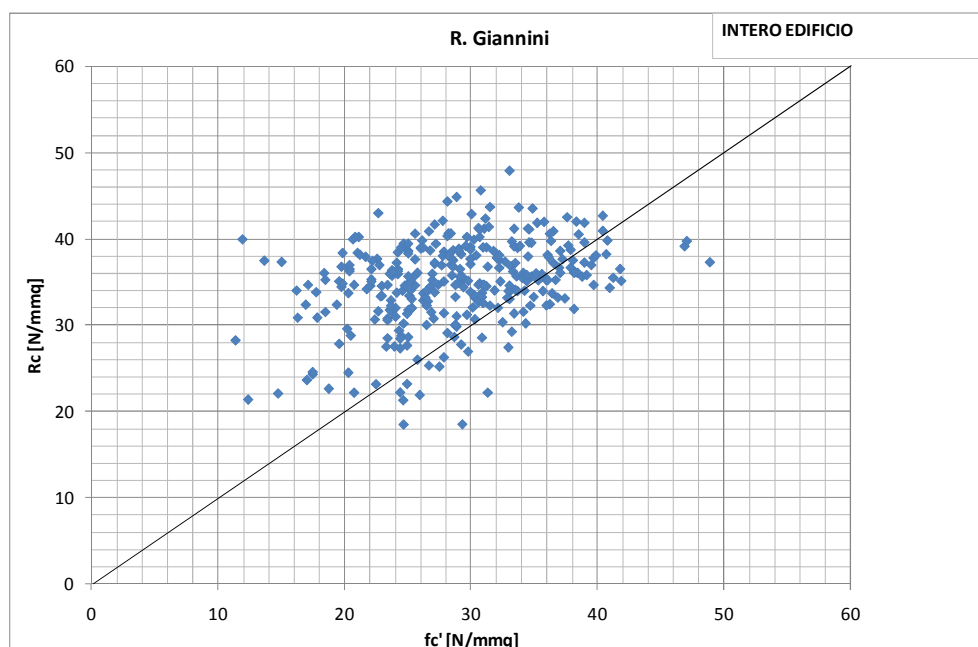
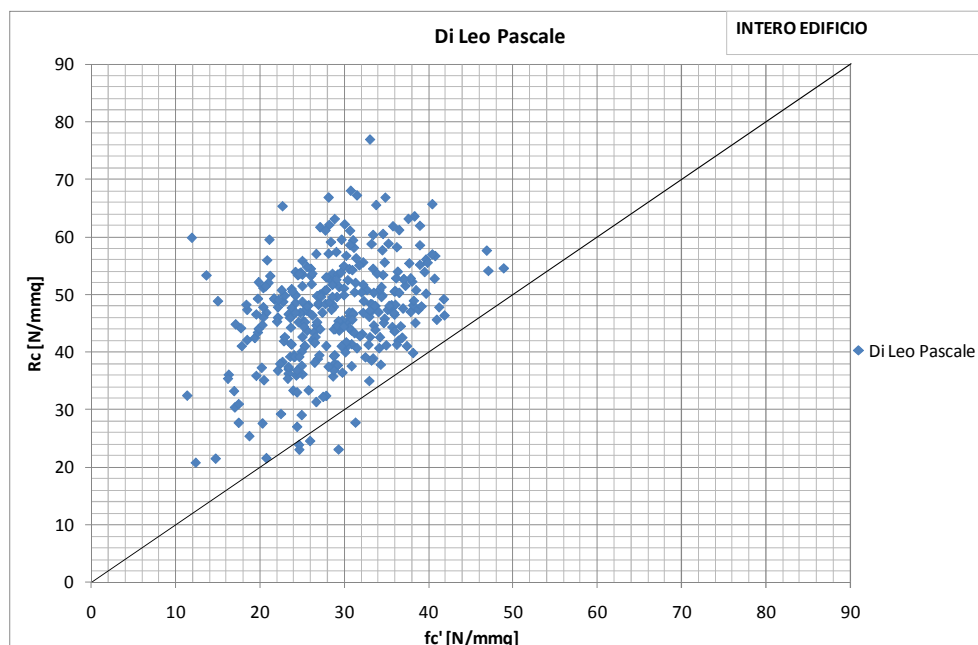


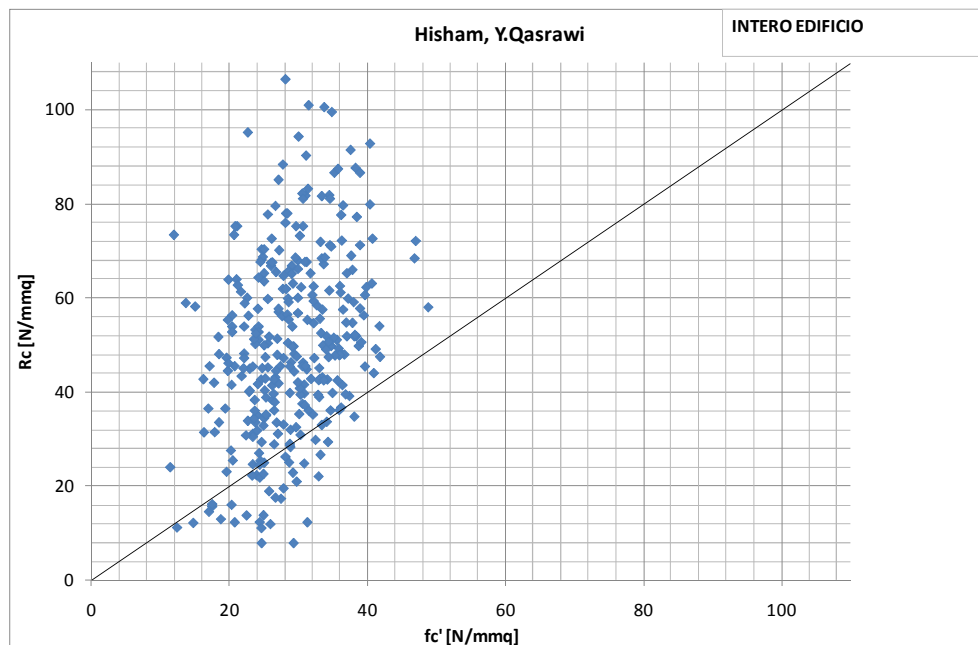
	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITA ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$
	0,88	0,88	1,32	1,35	1,82	1,45	2,58
	1,47	0,60	1,57	1,52	2,22	1,90	1,93
	2,11	0,69	2,01	1,85	2,85	2,49	2,11
	1,18	0,29	0,95	0,78	1,36	1,21	0,79
	1,37	0,34	1,11	0,91	1,59	1,41	0,92
	1,28	0,28	0,94	0,70	1,36	1,21	0,69
	0,97	0,19	0,67	0,46	0,97	0,87	0,45
	0,92	0,19	0,66	0,47	0,95	0,85	0,46
	1,06	0,80	1,50	1,55	2,19	2,10	2,64
	0,78	0,65	1,15	1,20	1,67	1,59	2,13
	1,02	0,65	1,34	1,35	1,97	1,91	2,16
	1,39	0,38	1,12	0,60	1,68	1,73	0,90
	1,17	0,34	0,97	0,57	1,46	1,50	0,83
	0,83	0,24	0,69	0,41	1,04	1,07	0,59
	1,26	0,61	1,45	1,40	1,95	1,43	1,99
	1,61	0,39	1,34	1,24	1,84	1,42	1,18
	1,13	1,33	1,66	1,59	2,20	1,52	3,18
	1,40	0,24	0,94	0,78	1,30	1,03	0,61
	1,29	0,33	1,10	1,03	1,51	1,17	1,01
	1,09	0,32	1,00	0,95	1,37	1,05	1,01
MEDIA	1,21	0,49	1,17	1,04	1,67	1,44	1,41
DEVIAZIONE STANDARD	0,31	0,29	0,35	0,43	0,48	0,42	0,84

Tabella 23: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm sesto piano









	INDICE DI RIMBALZO	VELOCITÀ ULTRASONORA	RILEM	Tanigawa Baba Mori	Di Leo Pascale	R. Giannini	Hisham, Y.Qasrawi
	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$	$R_c/f_{c'}$
MEDIA	1,08	0,39	1,25	1,20	1,70	1,27	1,82
DEVIATION STANDARD	0,28	4,29	0,35	0,35	0,46	0,33	0,77

Tabella 24: Riepilogo scarto quadratico medio carote Ø 32 mm intero edificio

Grafici Carote Ø 32 mm

Bibliografia

1. “Norme Tecniche delle Costruzioni” del 14 gennaio 2008
2. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Bozza di “Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le Costruzioni”, aggiornata al 07/03/2008
3. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3274 del 20 Marzo 2003 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” (pubblicata sulla G.U. del 8/5/2003)
4. “Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l’adeguamento sismico degli edifici esistenti”- OPCM 3431 (maggio 2005)
5. G. Manfredi, A. Masi, R. Pinho, G. Verderame, M. Vona, “Valutazione degli edifici esistenti in Cemento Armato”, IUSS Press
6. Cristiano Mariniello, , “una procedura meccanica nella valutazione della vulnerabilità sismica di edifici in c.a.” tesi di dottorato 2007
7. CEN (2004). European standard EN1998-3:2004: Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. European Committee for Standardisation.
8. V.D’Aria, “Corso di preparazione all’esame di livello 2 per il personale tecnico addetto ai controlli non distruttivi sul calcestruzzo in opera per l’indagine sclerometria”, Eurosit 2004
9. A. Masi et al.- “Indagini sperimentali sulla variabilità della resistenza del calcestruzzo negli elementi strutturali di edifici esistenti in c.a.”- AIPnD Milano 2005
10. A. Masi- “L’adeguamento sismico del patrimonio edilizio pubblico: il ruolo delle indagini per la riduzione dei costi di intervento”- Atti del Convegno: “Controllo e monitoraggio di edifici in c.a. Il caso studio di Punta Perotti”- Bari, 20 giugno 2007
11. G. Fabbrocino et al.- “La misura della resistenza del calcestruzzo nelle strutture esistenti”- AIPnD Milano 2005
12. “Non destructive test methods for evaluation of concrete in structure”- ACI 228. 2R -98 (reapproved 2004)

13. G. Menditto, “Basi fisiche del metodo”, dispensa didattica del corso di preparazione all’esame di 2° livello per il personale tecnico addetto ai controlli non distruttivi sul calcestruzzo in opera per prova ultrasonora organizzato dall’Eurosit.
14. M. Zonno & N. Milella, “Ortofoto da scansione laser per la progettazione”, CNR
15. ENEA, “Termografia edile e procedure d’indagine termografica
16. di interventi di restauro virtuale”
17. N. Labia, F. Lazzaroni- “Il caso studio di Punta Perotti: prove diagnostiche in situ”-Convegno AIPnD Milano 2007
18. A. Tatì , F. Carretto°, V.A.M. Luprano°, M. Puccini, A. Tundo- “Confronti tra strumenti ultrasonori e sviluppo di nuova strumentazione dedicata”- AIPnD Milano 2007
19. UNI EN, 2001. UNI EN 12504 – 2, Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive –Determinazione indice sclerometrico, dicembre 2001.
20. UNI EN, 2002. UNI EN 12504 – 1, Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Carote Prelievo, esame e prove di compressione, aprile 2002.
21. UNI EN, 2005. UNI EN 12504 – 4, Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Parte 4:Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici, gennaio 2005.
22. F. Verre A. Ciappa “Analisi radiografica su plinti di cemento armato provenienti dalla demolizione del sito Punta Perotti” - AIPnD Milano 2007
23. Giovanni Pascale, Antonio Di Leo, Controllo non distruttivo del calcestruzzo nell’edilizia industrializzata, Atti del Congresso C.T.E. 1984, Firenze.

Indice delle tabelle

Tabella 1: Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in cemento armato, acciaio ed acciaio – calcestruzzo (Istruzioni N.T.C. , 2008).	13
Tabella 2: Definizione dei livelli di rilievo e prove per edifici in c.a (Istruzioni N.T.C., 2008).....	17
Tabella 3: Caratteristiche del tubo radiogeno nel C.R. Trisaia.....	66
Tabella 4: Coefficienti di dilatazione termica.....	74
Tabella 5: Tabella riepilogativa delle prove in situ.....	86
Tabella 6: Valori di K_1	107
Tabelle 7: Di Leo Pascale: elementi tipo logicamente omogenei	110
Tabella 8: Istogramma delle frequenze relative	113
Tabella 9: Distribuzione delle resistenze per carote Ø 100 mm.....	116
Tabella 10: Distribuzione delle resistenze per carote Ø 32 mm.....	117
Tabella 11: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm piano interrato	134
Tabella 12: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm piano terra.	138
Tabella 13: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm primo piano	142
Tabella 14: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm secondo piano.....	146
Tabella 15: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm terzo piano.....	150
Tabella 16: Scarto quadratico medio carote Ø 100 mm sesto piano.....	154
Tabella 17: Riepilogo scarto quadratico medio carote Ø 100 mm intero edificio.....	158
Tabella 18: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm piano interrato	163
Tabella 19: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm piano terra	168
Tabella 20: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm primo piano	173
Tabella 21: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm secondo piano.....	178
Tabella 22: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm terzo piano.....	183
Tabella 23: Scarto quadratico medio carote Ø 32 mm sesto piano.....	187
Tabella 24: Riepilogo scarto quadratico medio carote Ø 32 mm intero edificio.....	191

Indice delle Figure

Figura 1: Impostazione di una campagna di prove (G. Manfredi et al.)	20
Figura 2: Pacometro	28
Figura 3: Sclerometro per calcestruzzo.....	30
Figura 4: Curve di taratura in dotazione allo sclerometro (D'Aria, 2004)...	34
Figura 5: Apparecchio ultrasuoni marca Sirio in dotazione ENEA.....	37
Figura 6: Diagramma a blocchi dell'apparato ultrasonoro (G. Menditto) ...	37
Figura 7: Effetto piezoelettrico diretto (G. Menditto, 2004)	40
Figura 8: Effetto piezoelettrico inverso (G. Menditto, 2004)	40
Figura 9: Localizzazione dei principali assi cristallografici in un cristallo di quarzo esadrale (G. Menditto, 2004).....	41
Figura 10: Effetto piezoelettrico (G. Menditto, 2004)	42
Figura 11: Tubo catodico a Raggi X.....	64
Figura 12: Particolare del tubo radiogeno.....	66
Figura 13: Bunker radiologico C.R. Trisaia.....	67
Figura 14: Prove paco metriche	77
Figura 15: Prove sclerometriche	79
Figura 16: Prove ultrasonore.....	80
Figura 17: Indagine termografica.....	82
Figura 18: Prove di carbonatazione.....	82
Figura 19: Rilievo dati post-carotaggio.....	84
Figura 20: Classificazione e imballaggio.....	85
Figura 21: Raccolta dati	86
Figura 22: Misure in laboratorio	88
Figura 23: Misure ultrasonore in laboratorio	90
Figura 24: prove meccaniche	90
Figura 25: Tipo di rottura.....	91
Figura 26: Correlazione tra le misure ultrasonore in situ ed in laboratorio in funzione dei piani dell'edificio (Tati et al., 2007)	92
Figura 27: Confronto tra le misure ultrasonore effettuate sullo stesso campione ma da 5 operatori diversi (Tati et al., 2007)	92
Figura 28: Complesso radiogeno Yxlon del C.R. ENEA Trisaia dotato di unità a potenziale costante con testa bipolare da kV 20- 450 mA 0,5-15 con movimentazione su tre assi	93

Figura 29: Pilastro 1, sezione 1 orizzontale e digitalizzazione radiografia (Verre & Ciappa, 2007).....	94
Figura 30: Pilastro 1 sezione 2 verticale e relativa digitalizzazione radiografica (Verre & Ciappa, 2007)	95
Figura 31: pilastro 2 sezione orizzontale e relativa digitalizzazione radiografica (Verre & Ciappa, 2007)	95
Figura 32: Pilastro 1 sez 3 orizzontale e relativa digitalizzazione radiografica (Verre & Ciappa, 2007)	96
Figura 33: Pilastro 1 sez. 4 orizzontale (Verre & Ciappa, 2007)	96
Figura 34: Pilastro 2 sez. A2 (Verre & Ciappa, 2007).....	97
Figura 35: Pilastro 2 sez. A2, digitalizzazione di due lastre radiografiche (Verre & Ciappa, 2007).....	97
Figura 36: Digitalizzazione Radiografica Pilastro 2 sez A 4 (Verre & Ciappa, 2007)	98
Figura 37: Grafico tipico relativo alla correlazione $R_c = A \cdot IR_m^b$	101
Figura 38: Grafico relativo alla formula di correlazione $R_c = c + (d/(k-V))$..	103
Figura 39: Grafico relativo alla formula di correlazione di Giannini	104
Figura 40: Grafico relativo alla formula di correlazione Hisham - Qsarawi	104
Figura 41: Abaco generico - Metodo SonReb.....	106
Figura 42: Grafico relativo alla formula di correlazione RILEM NDT1 ...	108
Figura 43: Grafico relativo alla formula di correlazione Di Leo Pascale ..	111
Figura 44: Grafico relativo alla formula di correlazione di Tanigawa Baba Mori.....	112
Figura 45: Curva gaussiana.....	114
Figura 46: Istogramma della distribuzione di resistenza a compressione delle carote da Ø 100 mm.....	116
Figura 47: Istogramma Istogramma della distribuzione di resistenza a compressione delle carote da Ø 32 mm.....	118
Figura 48: Grafico di confronto carota e microcarota relativo alla singola stazione, $R_c = c + (d/(k-V))$	119
Figura 49: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, RILEM	120

Figura 50: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Tanigawa	120
Figura 51: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Di Leo	121
Figura 52: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Giannini	121
Figura 53: Grafico di confronto carota e microcarota stazione W1, Hisham	122
Figura 54: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., vel. UT	123
Figura 55: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., RILEM	123
Figura 56: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Tanigawa	124
Figura 57: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Di Leo	124
Figura 58: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Giannini	125
Figura 59: Grafico di confronto carota e microcarota piano inter., Hisham	125

Ringraziamenti

Voglio ringraziare il dott. Massimo Puccini, responsabile della sezione ENEA FIM MATQUAL, che mi ha permesso di utilizzare in questa tesi i dati di proprietà dell'ENEA, acquisiti durante la campagna di prova svolta sugli edifici di "Punta Perotti" a Bari e alle successive prove di laboratorio.

Con amicizia e con affetto ringrazio tutti i miei colleghi dell'ENEA con cui ho condiviso, nelle attività descritte in questo lavoro, un'esperienza lavorativa unica e, probabilmente, irripetibile.

Non posso dimenticare il prof. ing. Antonello Porco che ha seguito tutte le predette attività ENEA.

Colgo l'occasione per mostrare riconoscenza al prof. ing. Gaetano Manfredi, che ha supervisionato la stesura della tesi.

Infine, rivolgo un ringraziamento particolare all'ing. Andrea Prota, che mi ha seguito in questo percorso di studio e nella stesura della tesi, consigliandomi con professionalità e incoraggiandomi nelle difficoltà incontrate.